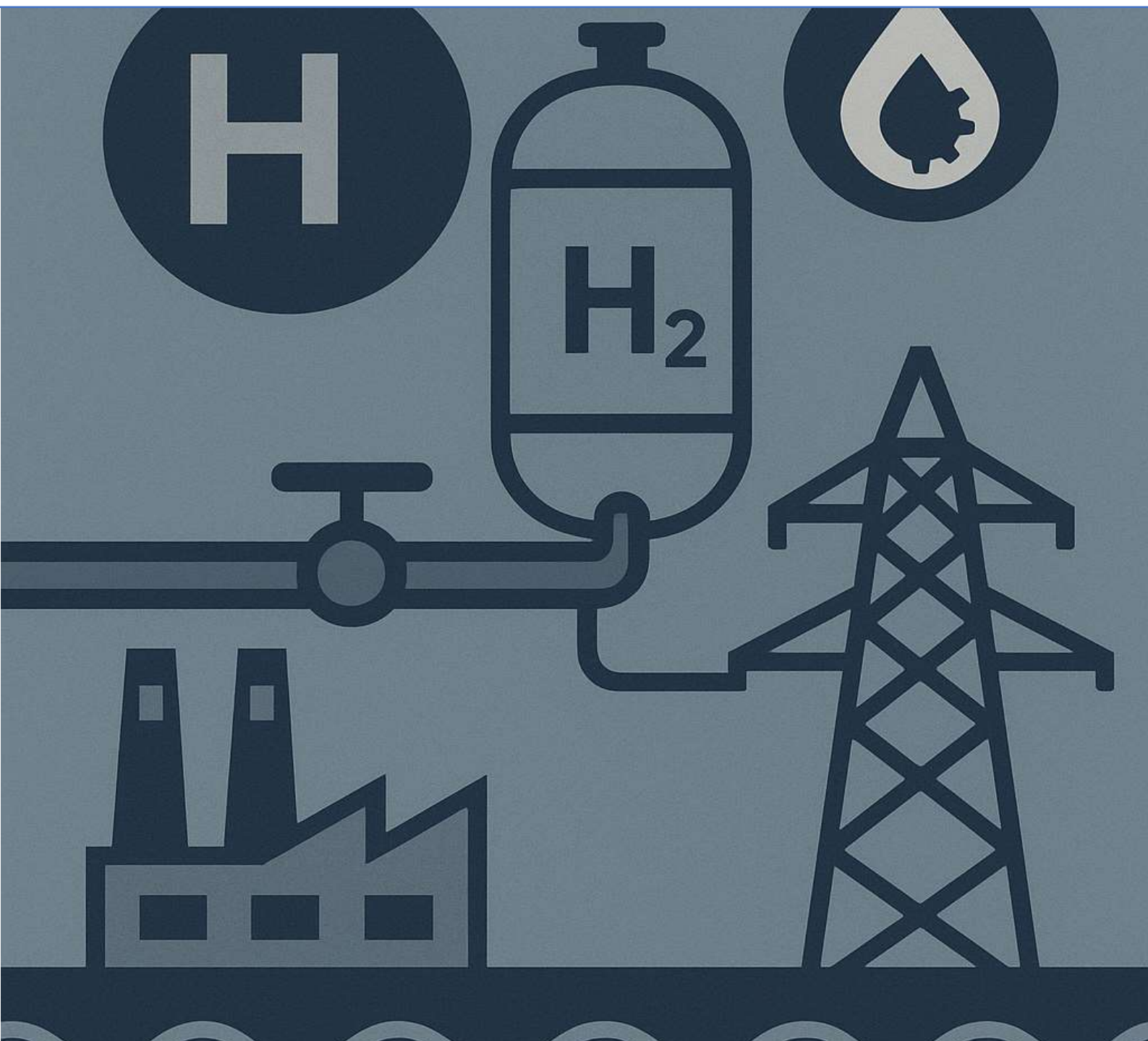


Hidrogén integrációja a földgázzsállításban 2025 konferencia kiadványa



DATA SHEET

Name	FLUMEN2 Proceedings
Website	http://uni-miskolc.hu/
ISBN number	ISBN 978-963-358-404-0
Publishers	University of Miskolc
Type of Reviewing	Peer-reviewed
Language	English, Hungarian

“The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

Bodnár István	A FÉMEK ÉS TÖMÍTŐANYAGOK HIDROGÉNNEL SZEMBENIVISELKEDÉSE ÉS HATÁSUK A SZENZOROK ÉLETTARTAMÁRA	1
Szabó Norbert Bodnár István	AKÜLÖNBÖZŐ TÍPUSÚ TÁVADÓK ÉRZÉKELÉSI MECHANIZMUSAI ÉS ALKALMASSÁGUK HIDROGÉNES KÖZEGBEN	10
Ildi Bölkény	A HIDROGÉN HATÁSA A TÁVADÓKRA: ANYAGOK, TÖMÍTÉS, ÁTERESZTÉS ÉS MEGBÍZHATÓSÁG	16
Ildi Bölkény	HIDROGÉN KÖZEGBEN ALKALMAZOTT DIFFERENCIÁLNYOMÁS- TÁVADÓK: PRIMER ELEMOK, DINAMIKA ÉS PONTOSSÁG	22
Ildi Bölkény	HŐMÉRSÉKLET-TÁVADÓK HIDROGÉNES KÖRNYEZETBEN: RTD ÉS HŐELEM MEGOLDÁSOK, CSOMAGOLÁS, VÁLASZIDÓ ÉS KALIBRÁLÁS	28
Ildi Bölkény	NYOMÁSTÁVADÓK HIDROGÉNALKALMAZÁSOKBAN: MÉRÉSI ELVEK, ANYAGVÁLASZTÁS ÉS ÜZEMELTETÉSI ÚTMUTATÓ	33
Ahmad Yasser Dakhel Ildi Bölkény	CALIBRATION STRATEGIES FOR O ₂ , H ₂ AND CH ₄ GAS AND PRESSURE TRANSMITTERS: METHODS, RISKS, COMPLIANCE	39
Ahmad Yasser Dakhel Ildi Bölkény	HYDROGEN VS. METHANE: THE EFFECT OF PERMEATION AND CALIBRATION INTERVALS ON THE ACCURACY OF DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTERS — A LITERATURE REVIEW AND EXPERIMENTAL OPPORTUNITY	44
Ahmad Yasser Dakhel Ildi Bölkény	ONLINE CONDITION MONITORING AND RISK-BASED CALIBRATION INTERVAL OPTIMIZATION FOR PRESSURE TRANSMITTERS A LITERATURE REVIEW AND FUTURE EXPERIMENTAL RECOMMENDATIONS	49
Zsófia Forgács	SEMI-AUTOMATED PRESSURE TRANSMITTER CALIBRATION WITH INSTRUMENT-LEVEL GPIB CONTROL AND REPORT INTEGRATION	54
Zsófia Forgács	SEMI-AUTOMATED CALIBRATION OF RESISTANCE THERMOMETERS WITH REFERENCE-LEVEL MEASUREMENT	63
Marcell Jobbágy	DEFINITION AND MODELING OF STABILITY IN CALIBRATABLE SENSORS	70
Marcell Jobbágy	The Validation of Calibration Models – International Approach	74
Dávid Matusz-Kalász	Hydrogen–Material Interactions and Their Impact on Pressure Sensors: A Review	78

Dávid Matusz-Kalász	Theoretical Interpretation of Repeatability Characteristics in the Context of Long- Term Testing	85
Dávid Matusz-Kalász	Estimation of Calibration Uncertainty: A Comparison Between Theory and Practice	92
PALLA GYULA	A HIDROGÉN FIZIKAI ÉS KÉMIAI TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A TÁVADÓK MŰKÖDÉSÉRE	98
PALLA GYULA	A MÉRŐESZKÖZÖK KALIBRÁLHATÓSÁGÁNAK IRODALMI ÁTTEKINTÉSE – SZENZORVÁLASZTÁSI SZEMPONTOK	105
Hussam Rostum	Definition of measurement capability and its metrological significance in a calibration environment.	111
Hussam Rostum	IMPLEMENTATION AND COMMISSIONING OF AN ATEX-CERTIFIEDHYDROGEN MEASUREMENT SYSTEM FOR MEASURING NATURAL GAS- HYDROGEN MIXTURES AND LONG-TERM TESTING OF MEASURING DEVICES	117
Dr. Bölkény Ildi Godó László Csaba	HIDROGÉNNEL DÚSÍTOTT METÁN VIZSGÁLATÁRA KÉSZÍTETT BERENDEZÉS	126
Dr. Bölkény Ildi Godó László Csaba	HIDROGÉNNEL DÚSÍTOTT METÁN TARTÓS ÜZEMŰ ANYAG- ÉS RENDSZERÁLLÓSÁGI VIZSGÁLATA	131

A FÉMEK ÉS TÖMÍTŐANYAGOK HIDROGÉNNEL SZEMBENI VISELKEDÉSE ÉS HATÁSUK A SZENZOROK ÉLETTARTAMÁRA

Bodnár István

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet; istvan.bodnar@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A tanulmány a szenzorokban alkalmazott fémek és tömítő anyagok élettartamra gyakorolt hatását mutatja be néhány jellegzetesen alkalmazott anyagtípusra vonatkozóan. A hidrogén egyre nagyobb szerepet kap az iparban, a járművekben és az energiaellátásban, emiatt a hagyományos technológiákban alkalmazott szenzorok anyagai nem feltétlenül alkalmasak magasabb hidrogéntartalmú gázok mérésére. A hidrogén mellett, hogy a legkisebb átmérőjű atom és mindenben átdiffundál, ridegedést is okozhat, amely a fémek esetében ridegtöréshez vezethet, így a szenzorok is meghibásodhatnak. A tanulmány az egyes szenzortípusok várható élettartama mellett bemutatja a számítási modellt is.

Keywords: fémek, tömítőanyagok, szenzorok, hidrogén, élettartam

1. Bevezetés

A hidrogén a XXI. század egyik kulcsfontosságú energiaforrásává válhat a zéró emissziós energiarendszerek és ipari folyamatok terjedésével. A hidrogén azonban nemcsak lehetőségeket, hanem anyagtudományi kihívásokat is hordoz. A hidrogén a legkisebb átmérőjű atom, amely minden ismert anyagon képes átdiffundálni, mindemellett anyagszerkezeti változásokat is elő tud idézni. A fémekben fellépő hidrogén okozta ridegedés (Hydrogen Embrittlement, HE) és a tömítőanyagok hidrogén-permeációja a különböző nyomás- és gázszenzorok élettartamát jelentősen csökkentheti. A probléma jelentősége főként az ipari hidrogén-érzékelők, nyomásmérők, valamint a tüzelőanyag-cellák monitoringrendszerei esetén kiemelkedő. Ezekben a szenzorokban a fémmembránok és tömítések a működés kulcselemei, amelyekre a hidrogén molekuláris és atomos formában is hat.

A hidrogén:

- Diffundál a fémrácsba, beépül diszlokációk és szemcsehatárok mentén.
- Mechanikai gyengülést okoz, repedés-kezdemények létrehozásával.
- Permeál a tömítőanyagokon, ami érzékenységesztéshez és drifthez vezethet.

A szenzorok tipikus élettartamát tehát nemcsak az elektronikai komponensek, hanem a mechanikai és anyagtudományi tényezők is meghatározzák.

2. A hidrogén–iparban alkalmazott lefőbb érzékelők

A hidrogéniparban a szenzorok fő célja a biztonságos üzemeltetés, a folyamatirányítás, és az energiahatékonyság. A legfontosabbak a hidrogénszivárgás-érzékelők, a nyomás- és áramlásmérők, valamint a kriogén hőmérséklet-érzékelők. Az iparágban egyre nagyobb szerepet kapnak a száloptikai és vezeték nélküli IoT-alapú szenzorhálózatok, amelyek valós idejű felügyeletet és prediktív karbantartást tesznek lehetővé.

2.1. Hidrogénkoncentráció- és szivárgásérzékelők

A lenti felsorolás tartalmazza a legfontosabb biztonsági szenzorokat, amelyek a levegőben megjelenő hidrogént detektálják.

- Elven alapuló típusok:
 - Katalitikus gyöngy (pellisztor): A hidrogén oxidációja hőt termel, amit az érzékelő regisztrál.
 - Fém tartalmú félvezetők (pl. Pd, Pt): A hidrogén adszorpciója vezetőképesség-változást okoz.
 - Elektrokémiai szenzorok: Hidrogén oxidációja elektromos jelet generál.
 - Optikai szenzorok: Pl. szín- vagy fényintenzitás-változáson alapuló száloptikai érzékelők.
- Jellemzők: Gyors válaszidő, alacsony ppm-es érzékenység, robbanásbiztos kialakítás.

2.2. Nyomásérzékelők

A hidrogén előállítása, tárolása és szállítása gyakran magas nyomáson történik (350–700 bar), ezért olyan érzékelőket szükséges választani a nyomás mérésére, amelyek ezen nyomáskategóriára terveztek.

- Tipikus technológiák:
 - Piezorezisztív és piezoelektromos szenzorok.
 - Kapacitív nyomásérzékelők.
 - Optikai vagy száloptikai nyomásmérők (pl. kriogén környezetben).
- Alkalmazás: Kompresszorok, palackok, csővezetékek és üzemanyagcellás rendszerek nyomásmonitorozása.

2.3. Hőmérséklet-érzékelők

A hidrogén kriogén (cseppfolyós) tárolásánál és reakciófolyamatokban kulcsfontosságú a hőmérséklet ismerete. Ennek mérésére különféle hőmérőszenzorokat alkalmaznak.

- Tipikus szenzorok:
 - PT100/1000 ellenálláshőmérők.
 - Termisztorok.
 - Kriogén hőmérséklet-mérő diódák vagy optikai szenzorok.

- **Megjegyzés:** A hőmérséklet-változás hatással lehet a szenzorok pontosságára, ezért gyakran integrált hőkompenzációt alkalmaznak.

2.4. Áramlásmérők

A hidrogén tömeg- vagy térfogatáramának pontos mérése nem csak az üzemanyag-ellátásban, hanem az ipari folyamatokban, a ki- és betárolási folyamatokban is szükséges.

- **Elterjedt megoldások:**
 - Tömegáram-mérők (Coriolis-elven).
 - Termikus áramlásmérők.
 - Ultrahangos áramlásmérők (sűrűségfüggetlenek, nincs mozgó alkatrész).

2.5. Oxigén- és inertgáz-szenzorok

A robbanásveszély csökkentése érdekében a tárolótartályok és rendszerek légterében gyakran ellenőrzik az oxigénszintet. Az ehhez használt szenzorok jellemzően Galvanikus cellás O₂-érzékelők, vagy cirkónium-dioxid alapú szondák.

2.6. Speciális szenzorok üzemanyagcellákhoz

Az üzemanyagcellás rendszerek integrált szenzorhálózatot alkalmaznak:

- H₂-koncentráció a bemeneti oldalon
- Vízgőz- és hőmérséklet-monitorozás
- Nyomáskülönbség-érzékelők a membrán védelmére

Táblázat 1 *Alkalmazott szenzorok összefoglaló táblázata*

Szenzor típusa	Működési elv / technológia	Tipikus alkalmazás	Jellemzők
Hidrogénkoncentráció / szivárgás	Katalitikus gyöngy, félvezető (Pd/Pt), elektrokémiai, optikai	Szivárgásérzékelés, biztonsági monitoring	Ppm érzékenység, gyors válasz, robbanásbiztos
Nyomásérzékelő	Piezorezisztív, piezoelektromos, kapacitív, száloptikai	Palackok, csővezetékek, kompresszorok	Nagy nyomástartomány (350–700 bar), pontos
Hőmérséklet-érzékelő	Pt100/1000, termisztor, kriogén dióda, optikai	Cseppfolyós H ₂ -tárolás, üzemanyagcellák	Kriogén tartomány, hőkompenzált
Áramlásmérő	Coriolis tömegáram, termikus, ultrahangos	Üzemanyag-ellátás, ipari folyamatok	Nagy pontosság, nincs mozgó alkatrész (ultrahang)
Oxigén-szenzor	Galvanikus cella, ZrO ₂ szenzor	Robbanásvédelem, inertizálás ellenőrzése	Tartálylégterek biztonsági monitorozása
Üzemanyagcella-specifikus	Kombinált H ₂ -, nyomás-, hőmérséklet- és páratartalom-szenzorok	Membránvédelem, hatásfok optimalizálás	Integrált szenzorhálózat, valós idejű adatgyűjtés

3. Irodalmi áttekintés

A hidrogén és a különböző fémek kölcsönhatását az utóbbi évtizedekben számos kutatás vizsgálta, különös tekintettel az ipari alkalmazásokra.

A vizsgált anyagok három fő csoportba sorolhatók:

1. Acélok és rozsdamentes acélok (pl. 304L, 316L, bainites acélok).
2. Könnyűfém ötvözetek (alumínium, titán, nikkel bázisú ötvözetek).
3. Polimer és kerámia alapú tömítőanyagok (PTFE, Viton, Al₂O₃ bevonatok).

3.1. Hidrogén viselkedése fémekben

A fémekben a hidrogén két lényeges folyamaton keresztül hat: adszorpció és diffúzió. A diffúziót az alábbi Fick-féle törvény írja le:

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

ahol:

- J – a hidrogén fluxus [mol/m²s],
- D – a hidrogén diffúziós együtthatója az adott fémbe [m²/s],
- dC/dx – a hidrogén koncentráció gradiense x irányban a fémbe [mol/m⁴].

A legfrissebb vizsgálatok szerint a hidrogén diffúziós sebessége erősen függ a fém mikroszerkezetétől és a csapdázóhelyek számától [1][2]. Például a finomszemcsés bainites acél nagyobb csapdaképességgel rendelkezik, ami csökkenti a repedésképződést, míg a 304L acél hosszabb távon hajlamosabb a permeációra [3].

3.2. Különböző fémek viselkedése

Az irodalmi források szerint a nikkel- és titánbázisú ötvözetek általában jobb hidrogénállósággal rendelkeznek, de költségesebbek [4][5].

Táblázat 2 Fémek / Ötvözetek diffúziós állandója

Fém / Ötvözet	Diffúziós állandó, D [m ² /s]	HE-hajlam	Tipikus alkalmazás
316L rozsdamentes	1,2×10 ⁻⁹	Közepes	Nyomásmembrán, szenzor
304L rozsdamentes	2,3×10 ⁻⁹	Magas	Csővezeték, szenzor
Ti-6Al-4V	8,1×10 ⁻¹¹	Alacsony	Repülőgép, szenzor
Ni-alapú ötvözetek	1,5×10 ⁻¹⁰	Közepes	Turbina, érzékelő

3.3. Hidrogén diffúzió és beépülés a szenzoranyagokban

A hidrogén bejutása a fémekbe több mechanizmuson keresztül történik:

1. Felületi adszorpció – a H₂ molekula disszociál, és a H-atom a fém felületéhez kötődik.
2. Diffúzió a rácsban – a H-atom intersticiálisan vándorol a rácsban.
3. Csapdázás és ridegedés – a H-atom a diszlokációk, szemcsehatárok vagy kiválások környezetében megreked, ami ridegedéshez és repedésképződéshez vezethet.

A diffúziós folyamat Fick II. törvényével modellezhető:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial^2} \quad (2)$$

ahol:

- $C(x,t)$ – az anyag koncentrációja [mol/m^3] hely (xxx) és idő (ttt) függvényében,
- D – a diffúziós együttható [m^2/s],
- $\frac{\partial C}{\partial t}$ – a koncentráció idő szerinti parciális deriváltja,
- $\frac{\partial^2 C}{\partial^2}$ – a koncentráció második térbeli deriváltja, ami a koncentrációgradiens görbületét jelzi.

Az érzékelők membránjainak tipikus vastagsága 50–200 μm , ami alapján a hidrogén-átjutási idő (t) becsülhető:

$$t \approx \frac{L^2}{D} \quad (3)$$

ahol:

- t – a diffúziós idő [s],
- L – a membrán vastagsága [m],
- D – a hidrogén diffúziós együtthatója az anyagban [m^2/s].

50 μm vastag membrán esetében 2,5 s; 200 μm membránvastagságnál pedig 40 s a diffúziós idő. Tehát a hidrogén kb. másodpercek–tíz másodpercek alatt képes átjutni egy tipikus vékony fémmembránon. Ez összhangban van azzal, hogy a nyomásérzékelőkben a hidrogén permeáció jelentős lehet, különösen magas hőmérsékleten.

A nemzetközi szakirodalomban talált publikációk három fő csoportba soroltuk:

1. Fémek hidrogénnel szembeni viselkedése
2. Tömítő- és bevonóanyagok permeációja
3. Szenzorélettartam és hibaesemények

Táblázat 3 Az alábbi táblázat az összegyűjtött adatokat foglalja össze.

Anyag	DHD_HDH [m^2/s]	HE hajlam	Tipikus hiba	Forrás
316L SS	1×10^{-9}	Közepes	Membránrepedés	[1,3]
304L SS	2×10^{-9}	Magas	Drift, átszivárgás	[1,4]
Ti-6Al-4V	8×10^{-11}	Alacsony	Csekély ridegedés	[2,5]
Ni-alapú ötvözet	$1,5 \times 10^{-10}$	Közepes	Késleltetett ridegedés	[4,6]
PTFE tömítés	$\sim 10^{-7}$	—	Diffúziós veszteség	[7]
Viton tömítés	$\sim 10^{-6}$	—	Gázáteresztés, öregedés	[7,8]
Al ₂ O ₃ bevonat	10^{-14}	—	Diffúzió gátlás	[9]

4. Hatás a szenzorok élettartamára

A szenzor élettartamát három tényező befolyásolja:

1. Permeáció okozta drift:

- A hidrogén vagy egyéb kis molekulák a fémmembránon keresztül lassan átjutnak.
- Ez hosszú távon nullpont-eltolódást okoz, ami a szenzor pontosságának romlásához vezet.
- Tipikus időskála: hónapok-évek, függ a membránvastagságtól és hőmérséklettől.

2. Ridegedés miatti mechanikai hiba:

- A hidrogén anyagridegedést okozhat a membránban.
- Idővel repedések, szivárgás léphet fel, ami a szenzor azonnali meghibásodását eredményezi.
- Kritikus főleg vékony membránú, ciklikus terhelésnek kitett szenzoroknál.

3. Tömítőanyagok öregedése:

- A polimer tömítések (O-gyűrűk, membrántömítések) hő, nyomás és gáz jelenlétében öregsenek.
- Ez vezethet mikroszivárgáshoz vagy a szenzor belső gázvesztéséhez.
- Általában időkorlátos folyamat, ezért sok gyártó 2-5 éves csereintervallumot ad meg.

Mivel a meghibásodás általában a leghamarabb öregedő komponens miatt következik be, ezért a nyomás- vagy gázszenzorok élettartamára jó közelítés az:

$$\tau_{\text{szenzor}} \approx \min(\tau_{\text{fém}}, \tau_{\text{tömítés}}) \quad (4)$$

ahol:

- τ_{szenzor} – szenzor élettartama,
- $\tau_{\text{fém}}$ – fémmembrán élettartama,
- $\tau_{\text{tömítés}}$ – tömítőanyag élettartama.

Néhány jellegzetes szenzoranyag várható élettartama:

- 316L membrán + Viton tömítés → várható élettartam: 2-3 év
- 316L membrán + Al₂O₃ bevonat + PTFE tömítés → 5-7 év
- Ti-6Al-4V membrán + kerámia bevonat → 8-10 év

Ez alapján a védőbevonatok és alacsony HE-hajlamú ötvözetek kulcsszerepet játszanak a szenzorok megbízhatóságának növelésében.

Gázszenzorok várható élettartama típus szerinti bontásban:

- Elektrokémiai szenzorok:
 - Általános működési idő: 2-3 év tipikusan (például CO, H₂S szenzorok).
 - Néhány hosszabb élettartamú O₂-szenzor akár 4-5 évig is üzemképes, ha jól karbantartják.
 - Ideális körülmények (20 °C, 60 % relatív páratartalom, rendszeres karbantartás): akár 5-11 év működési idő is elérhető.
 - Részletes a diagram: katalizátor degradáció kb. 6 éves élettartamot tesz lehetővé laboratóriumi körülmények között.

- Laboratóriumi hidrogén-szenzorok esetén az elvárt eltarthatóság (shelf life): kb. 6 hónap gyártástól való használatig.
- Katalitikus bead szenzorok (combustibles, CH₄ stb.): átlagos élettartam: ~5 év használattól függően.
- Infravörös (NDIR) és lézeres szenzorok: átlagosan hosszabb élettartam: 5–10 év, jellemzően akár 7–8 év.
- Szilárdtest (MOS) szenzorok: élettartam: kb. 2 év, néha valamivel több – függően a felhasználástól és környezettől.

Nyomásszenzorok várható élettartama:

- Gyakori garanciaidő: 12–24 hónap – ezen belül előfordulhatnak gyártási hibák vagy anyaghibák.
- MTTF (mean time to failure): statisztikai szinten több száz év is lehet (de ez nem azt jelenti, hogy egyetlen eszköz ilyen hosszú ideig működik).
- Mechanikai kopás általában nem jellemzi, mivel nincs mozgó alkatrész; inkább elektronikai komponensek/elhasználódás a meghibásodás oka.
- Egy tipikus nyomásérzékelő műszaki élettartama: 5–15 év, terheléses ciklusoktól függően akár 10–100 millió működési ciklus után is működőképes maradhat.

Szenzorok élettartamát befolyásoló hatások:

- Környezeti tényezők: hőmérséklet, páratartalom, szennyezők (pl. por, vegyi gőz) jelentősen gyorsítják az érzékelők elhasználódását.
- Használati intenzitás: magas koncentrációjú gázok gyakori jelenléte, gyakori exponálás lerövidíti az élettartamot.
- Karbantartás: rendszeres “bump test” és kalibráció nélkül drift, pontatlanság, végül érzékelőhiba következik be.
- Gyártói minőség: drágább, jól tervezett szenzorok jellemzően hosszabb élettartamúak és stabilabbak.

Ajánlások:

- Elektrokémiai szenzorok esetén tervezett cserék 2–3 év után.
- Használat intenzitása és környezeti viszonyok ismeretében hosszabb élettartam is elképzelhető – de pontos tervezéshez célszerű a gyártó specifikációit figyelembe venni.
- Rendszeres karbantartás, tesztek és dokumentáció segít optimalizálni az élettartamot.
- Nyomásérzékelők esetén a műszaki élettartam akár 10 év fölé is kiterjedhet, míg az elektronikai részek garanciája jellemzően 1–2 év.

5. Összefoglalás és következtetések

Összességében elmondható, hogy a szenzorokban alkalmazott anyagok közül jellemzően a műanyag komponensek élettartama a rövidebb, de egyes esetekben pl. gyártási hibák esetén a fémes összetevők meghibásodása is okozhatja a szenzorok tönkremenetelét. Az elektronikai alkatrészeket és áramköröket tartalmazó, bonyolultabb szenzorok meghibásodásának jellemző oka az elektronikai alkatrészek tönkremenetele.

Fő megállapítások:

- A tömítőanyagok jellemzően gyorsabb diffúziót engednek, mint a fémek, ezért bevonatok alkalmazása szükséges.
- A kerámia bevonatok (Al_2O_3 , TiAlN) jelentősen csökkentik a H-permeációt.
- A Ni- és Ti-ötvözetek a legjobb kompromisszumot adják tartósság és költség között.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

FELHASZNÁLT IRODALMAK

- [1] Chen et al., *Hydrogen trapping and embrittlement in metals – A review*, 2024 Y.-S. Chen, C. Huang, P.-Y. Liu, H.-W. Yen, R. Niu, P. Burr, K. L. Moore, E. Martínez-Pañeda, A. Atrens, & J. M. Cairney (2024). *Hydrogen trapping and embrittlement in metals – a review*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.07736>
- [2] Zhao et al., Hydrogen diffusion in Al alloys, 2022 Zhang, Z., Peeters, J., Popovich, V., & Ayas, C. (2022). Combined effects of stress and temperature on hydrogen diffusion in non-hydride forming alloys applied in gas turbines. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.006>
- [3] Ashcroft Blog, *Hydrogen permeation in pressure transducers*, 2023 Ashcroft (2023). *How Are Pressure Transducers Affected by Hydrogen Permeation?* Ashcroft Blog. blog.ashcroft.com+8ashcroft.eu+8blog.ashcroft.com
- [4] Li, Q., Ghadiani, H., Jalilvand, V., Alam, T., Farhat, Z., & Islam, M. A. (2024). *Hydrogen Impact: A Review on Diffusibility, Embrittlement Mechanisms, and Characterization*. *Materials*, 17(4), 965. <https://doi.org/10.3390/ma17040965>
- [5] Springer, J *Mater Res Technol* 10.1007/s40195-020-01039-7, 2020 Li, X., Ma, X., Zhang, J., et al. (2020). Review of Hydrogen Embrittlement in Metals: Hydrogen Diffusion, Hydrogen Characterization, Hydrogen Embrittlement Mechanism and Prevention. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33(6), 759–773. <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01039-7>
- [6] Zhao et al., Hydrogen diffusion in Ni alloys, 2022 Lu, X., Depover, T., & Sadeghi, B. (2022). Evaluation of hydrogen diffusion and trapping in nickel alloy 625 using thermal desorption spectroscopy. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.3390/hydrogen5030032>

-
- [7] ResearchGate, Hydrogen-assisted aging of sealing materials, 2023 Habib, A. K. M. A., Sakib, A. N., Mona, Z. T., Bhuiyan, M. M. H., Kazempoor, P., & Siddique, Z. (2023). Hydrogen-assisted aging applied to storage and sealing materials: A comprehensive review. *Materials*, 16(20), Article 6689. <https://doi.org/10.3390/ma16206689>
- [8] Lv, W., Yu, W., Wu, Z., Yan, Y., Shi, J., & Wang, M. (2025). Hydrogen-induced degradation of metallic materials—A short review. *Materials*, 18(3), Article 597. <https://doi.org/10.3390/ma18030597>
- [9] Wetegrove, M., Duarte, M. J., Taube, K., Rohloff, M., Gopalan, H., Scheu, C., Dehm, G., & Kruth, A. (2023). Preventing hydrogen embrittlement: The role of barrier coatings for the hydrogen economy. *Hydrogen*, 4(2), 307–322. <https://doi.org/10.3390/hydrogen4020022>



A KÜLÖNBÖZŐ TÍPUSÚ TÁVADÓK ÉRZÉKELÉSI MECHANIZMUSAI ÉS ALKALMASSÁGUK HIDROGÉNES KÖZEGBEN

Szabó Norbert¹, Bodnár István²

¹Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet; norbert.szabo1@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet; istvan.bodnar@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén, mint energiahordozó egyre nagyobb szerepet kap a fenntartható energiagazdálkodásban, különösen a közlekedésben, az ipari energiatermelésben és a vegyiparban. A hidrogén sajátos fizikai-kémiai tulajdonságai – kis molekulaméret, magas diffúziós képesség, anyagokkal szembeni ridegítő hatás – azonban komoly kihívásokat támasztanak a mérő- és vezérlőrendszerekkel szemben. A pontos és megbízható mérés kritikus fontosságú mind a folyamatbiztonság, mind a hatékonyság szempontjából. A tanulmány bemutatja a nyomás-, nyomáskülönbség- és hőmérséklet-távadók legfontosabb érzékelési mechanizmusait, kiemelve azokat a konstrukciós és anyaghasználati megoldásokat, amelyek alkalmassá teszik őket hidrogénes környezetben történő alkalmazásra. A vizsgálat kiterjed az anyagválasztásra (pl. 316L acél, titán, aranybevonat), a hegesztésmentes kialakításra, az olajmentességre, valamint a speciális membrán- és bevonattechnológiákra, továbbá röviden ismerteti a kiegészítő biztonsági hidrogén-érzékelési módszereket.

Keywords: hidrogén, távadó, nyomásérzékelő, nyomáskülönbség-érzékelő, hőmérséklet-érzékelő, anyagválasztás, robbanásvédelem

1. Bevezetés

A hidrogén egyre szélesebb körben kerül alkalmazásra a globális energiagazdaságban, köszönhetően magas fajlagos energiatartalmának (120 MJ/kg) és környezetbarát égéstermékének (vízgőz). Ugyanakkor kis molekulamérete és rendkívüli diffúziós képessége miatt különösen nehéz a kezelése és tárolása. A hidrogén a fémekbe diffundálva anyagfáradást és ridegedést okozhat (hydrogen embrittlement), ami különösen veszélyessé válhat nyomástartó edényekben, csővezetékben és mérőműszerekben. A távadók – amelyek az érzékelő által mért fizikai mennyiséget szabványos elektromos jellé alakítják – kulcsszerepet játszanak a folyamatfelügyeletben. Hidrogénes környezetben ezeknek a műszereknek nemcsak pontosnak és stabilnak kell lenniük, hanem ellenállónak is a diffúzió, korrózió és robbanásveszély hatásaival szemben. Jelen tanulmány célja, hogy bemutassa a leggyakrabban használt nyomás-, nyomáskülönbség- és hőmérséklet-távadók érzékelési mechanizmusait, és értékelje alkalmasságukat hidrogénes közegben.

2. Nyomástávadók hidrogénes alkalmazásokhoz

2.1. Érzékelési mechanizmus

A nyomásérzékelők működése többnyire piezorezisztív vagy piezoelektromos elven alapul:

- **Piezorezisztív:** a nyomásváltozás mechanikai feszültséget okoz egy membránban, amelynek alakváltozását félvezető nyúlásmérő bélégek mérnek.
- **Piezoelektromos:** bizonyos kristályok (pl. kvarc) elektromos töltést generálnak a rájuk ható nyomás hatására.



2.2. Konstrukciós megoldások

Hidrogénes közegben a legnagyobb kockázatot a hidrogén diffúziója és a mérőmembrán ridegedése jelenti. **A gyártók ezért:**

- Anyagválasztásban 316L ausztenites acélt, titánt vagy arannyal bevont kerámiát használnak.
- Hegesztésmentes kivitelben készítik a mérőcellát (monoblokk kialakítás).
- Olajmentes kialakítást alkalmaznak a töltőközeg diffúziójának elkerülésére.
- Speciális bevonatokat (pl. arany, kerámia) használnak a membránon a permeáció gátlására.

2.3. Példák nyomástávadókra

- Trafag Thin-Film-On-Steel: nitrogén-erősített acél membrán, hegesztés nélkül.
- Amsys AST H₂: AISI 316L monoblokk, EC79 tanúsítás.
- Althen AHP1000H: titán + Silicon-on-Sapphire technológia.
- Hydrotechnik HT-H₂: <1 ms válaszidő, ATEX/EC79 kompatibilitás.

3. Nyomáskülönbség-távadók

3.1. Érzékelési mechanizmus

A differenciál nyomásmérés alapja két mérőpont közötti nyomáskülönbség meghatározása. Ezt egy rugalmas membrán közvetíti, amely a nyomáskülönbség arányában deformálódik.

3.2. Hidrogénes környezet kihívásai

A mérőmembránon át történő hidrogén-permeáció jelentős driftet és meghibásodást okozhat. Ezért a mérőelemet gyakran arannyal vagy kerámiával vonják be, amelyek lényegesen csökkentik a hidrogén áthatolását.

3.3. Példa nyomáskülönbség-távadóra

- Fuji Electric FKC-Hydroseal: dupla bevonat (arany + kerámia), 42 MPa-ig, $\pm 0,15\%$ pontosság.

4. Hőmérséklet-távadók

4.1. Érzékelési mechanizmus

Leggyakrabban:

- RTD (Resistance Temperature Detector): fém ellenállás változása hőmérsékletfüggően (pl. Pt100).
- Termoelem (Thermocouple): két különböző fém közötti feszültségkülönbség hőmérsékletfüggése.

4.2. Hidrogénes alkalmazások

A hőmérsékletmérés közvetlenül kevésbé érzékeny a hidrogén diffúzióra, de a robbanásvédelem (ATEX, IECEx) itt is kulcsfontosságú.

4.3. Példák hőmérséklet-távadókra

- PR Electronics 7501: robbanásbiztos, terepi kivitel.
- PR Electronics 4116: univerzális, SIL 2 biztonsági kategória.



5. Kiegészítő hidrogén-érzékelési technológiák

Bár nem távadók, a biztonsági felügyelet részeként gyakran alkalmaznak speciális hidrogénérzékelőket, mint:

- Palládium alapú érzékelők: a Pd hidridek képződése miatt elektromos tulajdonságváltozás mérhető.
- Optikai módszerek (SPR, Fiber Bragg Grating): fényintenzitás vagy hullámhossz eltolódás érzékelése.
- Magneto-elektronikus módszerek: Hall-effektus, Kerr-rotáció, FMR.

6. Szisztematikus irodalom-összehasonlítás

Az 1. táblázat négy fő távadó-típust mutat be, különböző érzékelési mechanizmusokkal és hidrogén-kompatibilitási stratégiákkal. Az ipari hidrogénmérésnél kulcsfontosságú a permeáció csökkentése, a robbanásbiztonság, valamint a mérési pontosság és stabilitás hosszú távon.

Táblázat 1 Alkalmazott távadó típusok összefoglaló táblázata [1-6]

Távadó típus	Érzékelési mechanizmus	Hidrogén-kompatibilitás	Előny	Hátrány
Nyomás (316L, titán, thin-film)	Piezorezisztív/piezoelektromos	Hegesztésmentes, olajmentes, bevonat	Nagy pontosság, stabilitás	Magas költség
Nyomáskülönbség	Membrán eltolódás	Arany/kerámia bevonat	Permeáció minimalizálása	Komplex gyártás
Hőmérséklet	RTD/TC	Robbanásbiztos ház	Rugalmasság	Nem a hidrogénre optimalizált
Optikai/magneto	Fizikai jelmódosulás	Anyag- vagy optikai védelem	Gyors, kontaktmentes	Interferencia, fejlesztési fázis

Összegzés és trendek:

- Leginkább kiforrott technológia: Nyomástávadók — megbízhatóságuk és stabilitásuk miatt ipari sztenderd.
- Legspecifikusabb hidrogén-megoldás: Nyomáskülönbség-mérők arany/kerámia bevonattal, kifejezetten a permeáció csökkentésére.
- Legnagyobb rugalmasság: Hőmérséklet-távadók, bár nem hidrogénre specializáltak.
- Legnagyobb potenciál a jövőre: Optikai/magneto szenzorok a gyors és kontaktmentes mérés miatt.

A 2. táblázat különböző hidrogénmérési és -érzékelési megoldásokat mutat be, forráshivatkozásokkal kiegészítve. A felsorolt eszközök eltérő mérési elven működnek, és különböző mértékben optimalizáltak a hidrogénnel kapcsolatos alkalmazásokhoz. A bemutatott távadók és érzékelők a hidrogénipar több területén – például nyomás- és hőmérsékletmérésben, valamint biztonsági szivárgásérzékelésben – alkalmazhatók. A táblázat tartalmazza az egyes megoldások érzékelési mechanizmusát, hidrogén-kompatibilitási jellemzőit, fő előnyeit és korlátait, így átfogó képet ad a jelenleg elérhető technológiák erősségeiről és gyengeségeiről. Ez az áttekintés lehetővé teszi az egyes technológiák összehasonlítását, és alapot nyújt a megfelelő mérési megoldás kiválasztásához a konkrét alkalmazási környezet követelményeinek figyelembevételével.

Táblázat 2 Irodalmi összehasonlító táblázata [1-10]

Forrás	Távadó típusa	Érzékelési mechanizmus	Hidrogén-kompatibilitás	Előnyök	Korlátok
Trafag AG (n.d.)	Nyomás	Thin-film-on-steel piezorezisztív	Nitrogén-erősített ausztenites acél, hegesztésmentes	Hosszú élettartam, jó stabilitás	Magas gyártási költség
Amsys GmbH (n.d.)	Nyomás	Piezorezisztív	AISI 316L monoblokk, olajmentes, EC79	Jó korrózióállóság, biztonság	Korlátozott extrém hőmérséklet-tartomány
Althen Sensors (n.d.)	Nyomás	Silicon-on-Sapphire piezorezisztív	Titán szerkezet, ISO 11114-2, hegesztésmentes	Nagy nyomástartomány, kiváló pontosság	Magas ár
ESI Technology (n.d.)	Nyomás	Piezorezisztív	Titán, monoblokk, olajmentes	Magas nyomásig használható, jó kompatibilitás	Speciális gyártás igényes
Hydrotechnik GmbH (n.d.)	Nyomás	Piezorezisztív	316L acél, hegesztésmentes, olajmentes, EC79/ATEX	Nagyon gyors válaszidő (<1 ms)	Csak meghatározott nyomástartományokban
Fuji Electric France (n.d.)	Nyomáskülönbség	Membrán eltolódás piezorezisztív	Arany + kerámia bevonat a membránon	Minimalizált H ₂ permeáció, magas pontosság	Magas költségű bevonattechnológia
PR Electronics 7501 (n.d.)	Hőmérséklet	RTD/TC jelfeldolgozás	Robbanásbiztos ház, Ex d	Rugalmasság, terepi telepítés	Nem kifejezetten H ₂ -re optimalizált érzékelő
PR Electronics 4116 (n.d.)	Hőmérséklet	RTD/TC jelfeldolgozás	SIL 2, robbanásvédelem	Sokféle jel konvertálása	Érzékelő függ a külső mérőelem minőségétől
Wikipedia (n.d.)	Hidrogénérzékelők (biztonsági)	Palládium alapú, optikai, MEMS	Anyagválasztás (Pd, kerámia), kontaktmentes	Gyors reagálás, magas érzékenység	Interferencia más gázokkal
Ivanov et al. (2021)	Hidrogénérzékelők (biztonsági)	Magneto-elektronikus (Hall, Kerr, FMR)	Kontaktmentes, mágneses tulajdonságok mérése	Nagyon gyors mérés (~1 s), széles tartomány	Még fejlesztési fázisban, ipari bevezetés korlátozott

A források alapján jól látszik, hogy:

- **Nyomástávadók** dominálják a listát, melyek többsége piezorezisztív elven működik, speciális anyaghasználattal (316L acél, titán, Silicon-on-Sapphire) és hegesztésmentes kialakítással a hidrogén permeáció minimalizálása érdekében. Ezek iparilag kiforrott, magas pontosságú, de drága megoldások. [1-5]
- **Nyomáskülönbség-távadó** arany + kerámia bevonattal kifejezetten a hidrogén diffúzió elleni védelemre optimalizált, de a bevonattechnológia magas költsége korlátozza az elterjedését. [6]
- **Hőmérséklet-távadók** robbanásbiztos kivitelben rugalmasan alkalmazhatók, de nem kifejezetten hidrogénre optimalizált érzékelők; inkább támogató szerepet töltenek be. [7, 8]
- **Hidrogénérzékelők biztonsági célra** — palládium alapú optikai/MEMS és magneto-elektronikus megoldások — gyors reagálásra képesek, kontaktmentesek, viszont egyes technológiák még fejlesztési fázisban vannak, és érzékenyek a zavaró gázokra vagy környezeti hatásokra. [9, 10]



Trendek:

1. Anyagfejlesztés és bevonattechnológia előretörése:
 - Arany, kerámia és speciális acélötvözetek alkalmazása egyre elterjedtebb a hidrogén permeáció és korrózió csökkentésére.
 - Titán és Silicon-on-Sapphire konstrukciók a magas nyomás- és hőmérséklet-tűrés érdekében.
2. Integrált biztonsági megoldások térnyerése:
 - ATEX, EC79 és SIL tanúsítások szinte alapkövetelménnyé váltak a hidrogénes rendszerekben.
 - Robbanásbiztos házak és olajmentes kialakítások standardizálódnak.
3. Gyors és kontaktmentes érzékelés felé való elmozdulás:
 - Optikai és magneto-elektronikus érzékelők fejlesztése, amelyek másodpercen belüli válaszidőt biztosítanak.
 - Kihívás: ipari környezetben való interferenciamentes működés biztosítása.
4. Magas költség és ipari megbízhatóság kompromisszuma:
 - A legtöbb hidrogénre optimalizált szenzor drága anyagokat és összetett gyártást igényel, ami jelenleg a tömeges alkalmazás gátja.
 - Várható trend az árak csökkenése és a gyártási technológiák egyszerűsödése.
5. Jövő iránya: okos, hálózatba kapcsolt érzékelők:
 - Adatkommunikációs képességek (HART, IoT integráció) egyre fontosabbak a valós idejű hidrogénmonitorozásban.
 - Többparaméteres mérés (nyomás, hőmérséklet, gázkoncentráció) egy eszközön belül.

7. Összefoglalás és következtetések

A hidrogénes közeg speciális kihívásokat állít a távadók elé, amelyek csak gondos anyagválasztással, konstrukcióval és bevonattechnológiákkal kezelhetők. A jövőben várhatóan nő a kombinált (nyomás + hőmérséklet) érzékelők alkalmazása a beépítési pontok és szivárgási kockázatok minimalizálása érdekében. Kiegészítő hidrogén-érzékelési technológiák integrálásával növelhető a biztonság, különösen nagy nyomású rendszerekben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

FELHASZNÁLT IRODALMAK

- [1] Trafag AG. (n.d.). *Hydrogen pressure transmitters*. Trafag. <https://www.trafag.com/ch-en/industries/hydrogen/>
- [2] Amsys GmbH. (n.d.). *AST H₂ pressure transmitter for hydrogen applications*. Amsys. <https://www.amsys-sensor.com/ast-h2-pressure-transmitter-for-hydrogen-applications/>



-
- [3] Althen Sensors & Controls. (n.d.). *AHP1000H hydrogen-compatible high pressure transducer*. Althen Sensors. <https://www.althensensors.com/sensors/pressure-sensors/hydrogen-pressure-sensors/ahp1000-h-hydrogen-compatible-high-pressure-transducer/>
- [4] ESI Technology Ltd. (n.d.). *HP1000H hydrogen high pressure transmitter*. ESI Technology. <https://esi-tec.com/product/hp1000h-hydrogen-high-pressure-transmitter/>
- [5] Hydrotechnik GmbH. (n.d.). *HT-H₂ pressure sensor*. Hyfindr Marketplace. <https://hyfindr.com/en/shop/products/ht-h2-pressure-sensor>
- [6] Fuji Electric France. (n.d.). *Hydroseal differential pressure transmitter FKC*. Fuji Electric. <https://www.fujielectric.fr/en/product/pressure-measurement/hydroseal-differential-pressure-transmitter-fkc/>
- [7] PR Electronics A/S. (n.d.). *Field-mounted HART temperature transmitter for hydrogen 7501*. Hyfindr Marketplace. <https://hyfindr.com/en/shop/products/field-mounted-hart-temperature-transmitter-for-hydrogen-7501>
- [8] PR Electronics A/S. (n.d.). *Universal temperature transmitter for hydrogen applications 4116*. Hyfindr Marketplace. <https://hyfindr.com/en/shop/products/universal-temperature-transmitter-for-hydrogen-applications4116>
- [9] Wikipedia contributors. (n.d.). *Hydrogen sensor*. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_sensor
- [10] Ivanov, Y. P., González-Fuentes, C., & Vovk, R. (2021). *Review on magneto-electronic hydrogen gas sensors*. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2112.07296>



A HIDROGÉN HATÁSA A TÁVADÓKRA: ANYAGOK, TÖMÍTÉS, ÁTERESZTÉS ÉS MEGBÍZHATÓSÁG

Ildi Bölkény

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc;

ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén kölcsönhatásba lép a nyomás-, nyomáskülönbség- és hőmérséklet-távadók számos szerkezeti elemével. A kis atomméret, a magas diffúziós sebesség és a polimerek oldhatósága gyors gázdekompressziós károsodást, a töltőfolyadék gázosodását, nulla driftet és csökkent élettartamot okozhat. Ez a cikk a hidrogénüzemű távadók kulcsfontosságú alkotóelemeit elemzi: szigetelőmembránokat és bevonatokat, fémes és nemfémes építőanyagokat, tömítéseket és kábelbevezetőket, valamint töltőfolyadékokat. Az üzemeltetési és kalibrálási útmutatóval együtt gyakorlati kiválasztási kritériumokat és minimális validációs keretet kínál.

Kulcsszavak: hőmérséklet-távadók; nyomástávadó, nyomáskülönbség távadó; hidrogén hatása;

1. Bevezetés

A hidrogénalapú energiarendszerek olyan követelményeket támasztanak a távadókkal szemben, amelyek eltérnek a hagyományos földgázüzemű rendszerekétől. A hidrogént áteresztő fémmembránokban a gáz feloldódik a töltőfolyadékban, majd később kiáramolhat, míg a polimer tömítések és házak hajlamosak megduzzadni és mikroropedések kialakulására gyors nyomásesések után. Az ausztenites acélok ritkán ridegednek el gáz halmazállapotú hidrogénben a tipikus folyamatkörülmények között, ugyanakkor a vékony membránok és a hegesztések közelében lévő hőhatásövezetek érzékenyek a mikroszerkezetre és a felületkezelésre. Az anyag- és geometriaválasztás, a bevonatspecifikációk és a tömítési stratégiák, valamint a szabályozott hő- és nyomástranziensek együttesen határozzák meg a pontosságot és az élettartamot.

2. Hidrogénspecifikus jelenségek

A fémes szigetelőmembránokon keresztül a hidrogén disszociatív adszorpción megy keresztül, atomos formában diffundál a rácson keresztül, majd a másik oldalon újraegyesül; amint a töltőfolyadék telítetté válik, gázbuborékok képződnek, amelyek nulla- és span-eltolódásként jelentkeznek. A polimerekben a hidrogén oldhatósága térfogatnövekedést és mikroropedéseket idéz elő, különösen gyors gázdekompresszió esetén. A hermetikus üveg-fém vagy kerámia-fém átvezetések megbízhatóbban biztosítják a gáztömörséget, mint a tisztán polimer megoldások, míg a diffúziógátló bevonatok minősége szabályozza a töltőrendszerbe jutó hidrogén mennyiségét.

3. Fémes anyagok és bevonatok



A 316L továbbra is a leggyakoribb szigetelőmembrán-alapanyag az általános korrózióállósága és gyárthatósága miatt. Hidrogénes alkalmazásokhoz a vékony nemesfém-filmek – különösen az arany – széles körben elterjedtek, mivel a sűrű kristályszerkezetek csökkentik az áteresztőképességet. A nikkelalapú ötvözetek, mint például a Hastelloy C-276 vagy a Monel, korróziós előnyöket kínálhatnak, de nem feltétlenül biztosítanak alacsonyabb hidrogénáteresztő képességet; a választás a nyomás–hőmérséklet-tartománytól és a rezgésterheléstől függ. A bevonatok esetében a tapadás, a túrések, valamint a szelepműködés és tisztítási ciklusok alatti viselkedés kulcsfontosságú tervezési paraméterek.

4. Nemfémek anyagok és tömítések

A hidrogénnel szembeni tömítési teljesítményt az oldhatóság, a diffúziós együttható és a gyors gázdekompresszióval szembeni ellenállás határozza meg. Az EPDM és az FKM számos alkalmazásban jól bevált, bizonyos perfluor-elasztomerek (FFKM) nagyon széles hőmérsékleti tartományt fednek le, míg az NBR gazdaságos, de hajlamosabb az erőteljes duzzadásra. A PTFE és a PEEK kiváló kémiai ellenállást biztosítanak; azonban a tényleges gáztömörség nagymértékben függ a geometriától és a felületi érdességtől. A minősítést a NORSOK M-710 és az ISO 23936-2 tesztek alapján kell elvégezni, az üzemeltetési eljárásoknak pedig korlátozniuk kell a nyomásnövekedéseket.

5. Töltőfolyadékok és töltőrendszerek

A távadócellákhoz és a távvezeték-tömítésekhez használt gyakori töltőközegek közé tartoznak a szilikonolajok és a speciális fluorozott olajok. A hidrogén oldhatósága a nyomás és a hőmérséklet növekedésével fokozódik; telítődés után a buborékképződés lassú driftként és megnövekedett időállandóként jelentkezik. A hidrogénnel kompatibilis folyadék kiválasztása, a holtterfogat minimalizálása és a rendszeres szellőztetés hozzájárul a stabilitás megőrzéséhez. A kapillárisok hővédelme és szimmetriája mérsékli a nulla driftet.

6. Üzemeltetési és minősítési szempontok

Az üzembe helyezés során előnyben kell részesíteni a fokozatos nyomásnövelést és -csökkentést, a felesleges tranziensek elkerülését, valamint az alapos légtelenítést. A diagnosztikai funkciók, a NAMUR NE 107 állapotjelzés és az IEC 61508 szerinti funkcionális biztonsági képességek támogatják a karbantartási tervezést a hidrogénüzemű telephelyeken. Az alkatrészek kiválasztását laboratóriumi vizsgálatokkal és terepi validációval kell alátámasztani; a csereintervallumok és az ellenőrzési időszakok kockázat- és költségalapú stratégiák mentén határozhatók meg.

7. Az alkatrészek kölcsönhatási térképének értelmezése

Ez a szakasz bemutatja, hogyan kell értelmezni az alkatrészenkénti kockázati térképet. A távadók esetében a hidrogén hatása ritkán jelentkezik hirtelen meghibásodásként; gyakrabban fokozatos teljesítményromlás formájában mutatkozik meg. A töltőrendszerben feloldódott, majd később kigázosodó hidrogén lassú nullpont-eltolódást és megnövekedett időállandót okoz, míg a polimer elemek duzzadása és mikropedései rontják a gáztömörséget. A tünetek elkülönítéséhez hasznos megkülönböztetni a termikus tranziensek okozta rövid idejű eltolódásokat a tartós elmozdulásoktól; ez utóbbiak jól nyomon követhetők diagnosztikai trendek és időszakos referenciaellenőrzések segítségével.



A mérséklés az anyag- és bevonatválasztással kezdődik, a holtterfogatok minimalizálásával és megfelelő szellőztetéssel folytatódik, majd a hő- és nyomástranziensek szabályozásával, valamint a beépített önellenőrző funkciók tudatos alkalmazásával válik teljessé.

1. táblázat Hidrogén–anyag kölcsönhatások a távadók fő komponensein

Komponens	Fő kölcsönhatás	Hajtóerő	Jellemző tünet	Mérséklési stratégia
Elválasztómembrán	H ₂ -permeáció	Magas p, emelkedő T, vékony fal	Nullpont- és tartományeltolódás	Nemesfém-bevonat; minimális holtter; rendszeres légtelenítés
Töltőfolyadék	Oldódás, gázosodás	Telítődési állapot, ciklikus p–T	Időálló-növekedés, drift	H ₂ -kompatibilis olaj; rövid kapilláris; hővédelem
Tömítések	Dagadás, mikro-repedés (RGD)	H ₂ -oldékonyság, gyors nyomásesés	Szivárgás, gázzárás romlása	RGD-minősített anyag; nyomáslépcsők kontrollja
Átvezetések	Permeáció a polimer elemeken	Magas Δp, hosszú idő	Lassú szivárgás, IP-szint romlása	Üveg-fém/kerámia-fém hermetikus átvezetés; minőségi kábelbevezető
Ház / menetek	Felületi kúszás, korrózió	Kondenzátum, szennyezők	Menet-lazulás, korróziós nyomok	Anyag- és bevonatvédelem; megfelelő meghúzási nyomaték

8. A tömítési táblázat értelmezése

A tömítés teljesítményét nem csupán az elasztomercsalád határozza meg. Számít a receptúra, a térhálósodás mértéke, a keménység, a töltőanyagok, valamint az üzemi tartomány is. Hidrogén esetében a gyors gázdekompresszió az a terhelési mód, amely a legnagyobb valószínűséggel okoz mikrorepedéseket és a gáztömörség elvesztését; az elsődleges védelmet a minősített anyagok és a szabályozott nyomásemelkedések jelentik. A geometria és a felületi érdesség kritikus fontosságú a tényleges gáztömörség szempontjából, akárcsak az összeszerelési nyomaték és a hőmérsékleti profil.

A PTFE esetében a kompromisszumot a hidegfolyás jelenti; az FKM/FFKM esetében a költségeket és a hőtágulást kell figyelembe venni; míg az EPDM esetében az üzemi hőmérsékleti határok a meghatározóak. A táblázatot a hidrogénoldhatóság és az RGD-ellenállás együttes figyelembevételével kell értelmezni, mint az élettartam előrejelzőit; a választási lehetőségeket a helyszínre jellemző nyomás–hőmérséklet-profil és a karbantartási ciklusok alapján célszerű validálni.

2. táblázat Elasztomer és polimer tömítések hidrogénes közeghez

Anyag	H ₂ -oldékonyság / dagadás	RGD-állóság	Hőmérséklet-tartomány (tipikus)	Tipikus alkalmazás	Megjegyzés
EPDM	Közepes	Jó (minősítéstől függ)	–40...+120 °C	Általános tömítések	Jól validált; P–T lépcsőkre érzékeny
FKM (Viton)	Alacsony–közepes	Jó	–20...+200 °C	Magasabb hőmérsékletű feladatok	Fluorozottság miatt kedvező permeációs viselkedés
FFKM	Alacsony	Nagyon jó	–15...+260 °C	Kritikus pontok	Költséges; kiváló kémiai állóság
NBR	Közepes–magas	Korlátozott	–30...+100 °C	Alap feladatok	H ₂ -ban nagyobb dagadási kockázat
PTFE	Nagyon alacsony	Nem elasztomer	–200...+200 °C	Ülékek, betétek	Hidegfolyás; felületi érdesség kritikus
PEEK	Nagyon alacsony	Jó	–50...+250 °C	Gyűrűk, alátétek	Jó mechanikai stabilitás és gázzárás

9. Membrán- és bevonatstratégia kiválasztása



A diffúzió csökkentésének két fő eszköze van: a sűrű nemesfém-filmek alkalmazása és az erős korrózióállóságú alapanyagok használata. A vékony aranyrétegek hatékony permeációs gátat képeznek, ugyanakkor érzékenyek a mechanikai sérülésekre és a durva tisztítási eljárásokra. A tantálbevonatok előnyösek lehetnek magasabb hőmérsékleten és agresszív közegekben, bár a megfelelő tapadás és a hőtágulás összehangolása gondos tervezést igényel.

A felületkezelések csak akkor érik el a kívánt hatást, ha a holtterfogatok kicsik, a rendszer alaposan légteleníthető, és az üzemeltetési gyakorlatok elkerülik az ismétlődő túlterhelési tranzienseket. A következő táblázat azt a gyakorlatot tükrözi, hogy a bevonat kiválasztását a teljes mérési lánc – beleértve a kapillárisokat, a töltőfolyadékokat, a szerelvényeket és a tisztítási eljárásokat – összefüggésében kell elvégezni.

3. táblázat Membrán- és bevonatopciók a hidrogén-permeáció mérséklésére

Alapanyag	Bevonat / felület	Relatív permeáció	Korlátok	Tipikus alkalmazás
316L ausztenites acél	Arany (Au) vékonyréteg	Alacsony	Sérülékeny a karcolásokra; költséges	H ₂ -kritikus pontok, remote seal
316L / Hastelloy	Tantál (Ta) bevonat	Alacsony–közepes	Tapadás és hőtágulási illesztés megoldandó	Magas hőmérsékletű alkalmazások
Nikkelalapú ötvözet	Nitrid/DLC típusú keményréteg	Közepes	Filmek repedéken érzékenyek	Kopásállóság + mérsékelt diffúziógát
316L (polírozott)	Passzívált felület	Közepes–magas	Nincs valódi diffúziógát	Általános, nem H ₂ -kritikus feladatok

Megjegyzés: A „316L” ausztenites króm-nikkel-molibdén rozsdamentes acél alacsony széntartalmú változata (EN 1.4404 / 1.4435; tipikusan ~16–18% Cr, 10–14% Ni, 2–3% Mo, C ≤ 0,03%). Jó hegeszthetőség és általános korrózióállóság jellemzi; membránoknál és tokozásoknál elterjedt alapanyag. Hidrogénnel szemben nem diffúziógát, ezért H₂-kritikus pontokon gyakran nemesfém- (pl. Au) vagy tantálbevonattal alkalmazzák.

10. Következtetések és ajánlások

A hidrogén leggyakrabban permeáción és polimermechanikai jelenségeken keresztül fejt ki hatását a távadókra. A hosszú távú stabilitás függ a membránok és bevonatok diffúziócsökkentő stratégiáitól, a minősített, hidrogénkompatibilis tömítésektől és átvezetőktől, a töltőrendszerek minimális holtterfogatótól, valamint a termikus és nyomástranziensek fegyelmezett szabályozásától.

A diagnosztikai funkciók következetes alkalmazása, a szigorú szellőztetési és kalibrálási eljárások, valamint az elismert minősítésekhez (NORSOK M-710, ISO 23936-2, IEC 61508, NAMUR NE 107) kötött alkatrész kiválasztás biztosítja a pontosságot és a megbízható működést mind tiszta hidrogén, mind hidrogén–metán keverékek esetén.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.



REFERENCIÁK

- [1] ISO (2011/2022). *ISO 23936-1/-2 — Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production (Thermoplastics / Elastomers)*. <https://www.iso.org/standard/41948.html> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [2] NORSOK (2014). *M-710 — Qualification of non-metallic sealing materials and manufacturers (RGD, sour-gas ageing)*. <https://www.standard.no/en/norsok/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [3] NAMUR (2017/2025). *NE 107 — Self-monitoring and diagnostics of field devices (overview & revision notes)*. <https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-107-has-been-revised.html> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [4] IEC (2022). *Overview of IEC 61508 & Functional Safety (brochure)*. <https://assets.iec.ch/public/acos/IEC%2061508%20%26%20Functional%20Safety-2022.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [5] Honeywell (2025). *Hydrogen Permeation — Causes and Prevention (White Paper)*. <https://process.honeywell.com/content/dam/process/en/campaigns/pmc/smartline-solutions-for-hydrogen/documents/hon-ia-pmc-wpr-hydrogen-permeation-a4.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [6] Endress+Hauser (USA) (2019). *Why is Hydrogen permeation so destructive to pressure transmitters? (White Paper)*. <https://www.us.endress.com/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [7] Fuji Electric (FR) (2024). *Hydrogen permeation — whitebook (All V5)*. <https://www.fujielectric.fr/wp-content/uploads/2024/02/whitebook-product-pressure-measurement-hydrogen-transmitter-permeation-All-V5-en.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [8] Yokogawa (2025). *Hydrogen permeation — application note / overview*. <https://www.yokogawa.com/th/library/resources/application-notes/hydrogen-permeation/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [9] WIKA (n. é.). *Hydrogen permeation on diaphragm seals — Application Note*. <https://www.wika.com/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [10] Ashcroft (2025). *How are pressure transducers affected by hydrogen permeation?* <https://ashcroft.eu/how-are-pressure-transducers-affected-by-hydrogen-permeation/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [11] Druck (Baker Hughes) (2024). *Design considerations for choosing a hydrogen pressure sensor (White Paper)*. <https://dam.bakerhughes.com/m/67c5346c96f2ef26/original/Druck-Hydrogen-Sensor-Article-EN.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [12] Rönnebro, E. C. E.; Oelrich, R. L.; Gates, R. O. (2022). *Recent Advances and Prospects in Design of Hydrogen Permeation Barrier Materials for Energy Applications — A Review*. *Molecules*, 27(19), 6528. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/19/6528> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [13] PNNL (2022). *Hydrogen permeation barrier materials — publication summary*. <https://www.pnnl.gov/publications/recent-advances-and-prospects-design-hydrogen-permeation-barrier-materials-energy> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [14] ABB (2019). *Pressure measurement — material compatibility & permeation (Technical document TD_2600T_CORROSION)*. https://library.e.abb.com/public/c5c2cea397b741d5b736a7902b9be858/TD_2600T_CORROSION-EN_C%2012_2019.pdf (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [15] Emerson / Rosemount (2018). *Material Selection Considerations for Pressure Transmitters (Technical Note)*. <https://www.emerson.com/documents/automation/technical-note-material-selection-considerations-for-pressure-transmitters-rosemount-en-77770.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [16] James Walker (2022). *An introduction to Rapid Gas Decompression (RGD)*. <https://www.jameswalker.biz/knowledge/insights/introduction-to-rgd> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [17] Parker Hannifin (n. é.). *NORSOK M-710, ISO 23936-2 & API 6A — RGD and sour-gas ageing — Technical summary (ORD-5774)*. <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5774-NORSOK--ISO--and-API.pdf> (letöltve: 2025. szeptember 28.)



-
- [18] Microsensor (2025). *Why does hydrogen pressure measurement matter? — design notes*.
https://www.microsensorcorp.com/Details_Why-Does-Hydrogen-Pressure-Measurement-Matter.html (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [19] IEC (2010–2020). *IEC 60751 (RTD) és IEC 60584-1 (thermocouples) — vonatkozó hivatkozások a hőmérséklet-távadókra*.
<https://webstore.iec.ch/> (letöltve: 2025. szeptember 28.)
- [20] NAMUR (2019). *NE 21 — Electromagnetic compatibility of equipment for industrial processes and laboratory (overview)*.
<https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-21-has-been-revised-2.html> (letöltve: 2025. szeptember 28.)



HIDROGÉN KÖZEGBEN ALKALMAZOTT DIFFERENCIÁLNYOMÁS-TÁVADÓK: PRIMER ELEMOK, DINAMIKA ÉS PONTOSSÁG

Ildi Bölkény

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc;

ildi.bolkenny@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén alacsony sűrűsége és a földgázhoz képest nagyobb összenyomhatósága alacsonyabb differenciálynymást, módosult Reynolds-szám tartományokat és érzékenyebb telepítési viselkedést eredményez a Δp -alapú mérések során. Ez a cikk áttekinti az összenyomható áramlások Δp -elméletének alapjait, bemutatja a primer elemek (peremlemez, Venturi-cső, V-kúp, fúvóka, átlagoló Pitot-cső, ék) jellemzőit hidrogénes alkalmazásban, és elemzi a hidrogénspecifikus kockázatokkal járó Δp -távadó rendszereket: távoli tömítések és kapillárisok, töltőfolyadék gázosodása, valamint nulla- és span-eltolódások. A gyakorlati szempontok közé tartozik a kalibrálás, az összetétel-függő korrekciók és egy kompakt bizonytalansági keret. A táblázatok összehasonlítják a primer elemeket, feltérképezik a Δp -rendszer tervezési lehetőségeit a hidrogénnel kapcsolatos kockázatok mentén, és összefoglalják a reprezentatív bizonytalansági keretet.

Kulcsszavak: differenciálynymás-mérés; hidrogénes közeg; primer áramláselemek; távoli leválasztó és kapillárisok;

1. Bevezetés

A differenciálynymás-mérés továbbra is az egyik legelterjedtebb módszer az ipari áramlás- és állapotfelügyelet terén. Hidrogén vagy hidrogén–metán keverékek esetén az alacsony sűrűség és viszkozitás együttesen alacsonyabb Δp értéket eredményez adott tömegáramnál, míg a nagy hangsebesség és az összenyomhatóság növeli az elsődleges elem kiválasztásának, a β -arány (d/D) meghatározásának és a szükséges egyenes szakasz hosszának a jelentőségét. Az adórendszer szempontjából ez szigorúbb dinamikai és stabilitási követelményeket jelent, különösen távoli tömítések alkalmazása esetén.

2. Rövid elméleti alapok

Összenyomható közegek esetén a klasszikus Bernoulli- és folytonossági egyenleteket a sűrűség és az összenyomhatóság figyelembevételével kell alkalmazni. A legtöbb primer elem esetében a tömegáram közelíthető a következő képlettel:

$$\dot{m} = C \cdot \varepsilon \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}$$

ahol C a kiáramlási együttható, ε a tágulási tényező, A a torokfelület, ρ a sűrűség, Δp pedig a mért nyomáskülönbség. Hidrogén esetén az alacsonyabb ρ azt jelenti, hogy ugyanazon tömegáramhoz alacsonyabb Δp tartozik, ami közvetlenül befolyásolja a jel-zaj viszonyt és az adó mérési tartományának megválasztását. A C és ε értéke függ az elem



geometriájától, a Reynolds-számtól és a β -aránytól; ennek következtében a hidrogénarány és a hőmérséklet változásai is hatással vannak a kalibrációs görbére.

3. Hidrogénspecifikus problémák a Δp -távadó rendszerekben

A Δp távadók gyakran távoli tömítéseken és kapillárisokon keresztül csatlakoznak a primer elem felső és alsó nyomáscsatlakozásaihoz. Hidrogén jelenlétében a gáz diffundálhat a töltőfolyadékba, ahol buborékokat képezhet a kapillárisokban és a távadó testében, ami nulla driftet és az időállandó növekedését okozza. A rövid, hővédett kapillárisok, a minimális holtterefogat, a nagy diffúzióállóságú membránbevonatok és a rendszeres légtelenítés csökkentik ezeket a kockázatokat. A dinamikus viselkedést együttesen befolyásolja a kapilláris térfogat, a töltőfolyadék viszkozitása, a membrán rugalmassága és az elsődleges elem futásának akusztikai tulajdonságai.

4. Kalibrálás, összetétel és bizonytalanság

A hidrogénes alkalmazásokhoz végzett kalibrálásnak szabályoznia kell a hidrogénarányt, a hőmérsékletet és a nyomást, mivel a sűrűség és a tágulási tényező közvetlen hatással van a következtetett tömegáramra. A bizonytalanság fő forrásai jellemzően a Δp távadó alap- és hőmérsékletfüggő hibái, a primer elemhez tartozó C és ε értékek bizonytalanságai, a telepítési hatásokból eredő korrekciók, valamint a sűrűség- és összetétel-meghatározás hibái. A megbízhatóság fenntartása érdekében elengedhetetlenek a rendszeres helyszíni ellenőrzések és a diagnosztikai mutatók — például a nullpont, az időállandó és a zajszint — trendjének folyamatos nyomon követése.

5. Primer elemek összehasonlítása hidrogénes alkalmazásban

A következő táblázat célja, hogy egységes keretrendszerben mutassa be a leggyakrabban alkalmazott primer elemek viselkedését alacsony sűrűségű, erősen összenyomható gázok esetén. A „tipikus Δp ” oszlop az adott tömegáramnál várható jelszintet jelzi; hidrogén esetében ez általában alacsonyabb a kisebb sűrűség miatt, ami különösen fontossá teszi a jel-zaj arányt és a megfelelő távadó-tartomány kiválasztását.

A „lecsengés” oszlop azt a használható tartományt fejezi ki, amelyen belül a megadott pontosság változó üzemi körülmények mellett is fenntartható. Az „egyenes lefutás” követelmények és a „szennyeződéstűrés” együttesen határozzák meg a telepíthetőség rugalmasságát; nagyobb áramlási sebességek és a gázrácsokban kialakuló könyök okozta örvénylés esetén a megfelelően kondicionált bemeneti szakaszok különösen fontosak.

A „megjegyzés” oszlop a hidrogénre jellemző szempontokat emeli ki, amelyek eltérhetnek a földgázra kalibrált ajánlásoktól, és befolyásolhatják az elemválasztást.

1. táblázat *Primer elemek összehasonlítása hidrogénes közegben*

Primer elem	Jellemző Δp adott tömegáramnál	Turndown (tipikus)	Beépítési hossz igény	Szennyeződés-tűrés	Megjegyzés H_2/H_2-CH_4 esetén	Tipikusan elérhető pontosság
Orifice (mérőperem)	Közepes–magas	3:1–4:1	Hosszú egyenes szakasz szükséges	Közepes	Szabványos, költséghatékony; kis ρ mellett a Δp alacsony lehet	0,8–1,5% a leolvasott értékből
Venturi	Alacsony–közepes (jó jel/zaj)	4:1–10:1	Közepes	Jó	Kisebb állandó nyomásvesztés, stabil C-tényező	0,5–1,0%



Primer elem	Jellemző Δp adott tömegáramnál	Turndown (tipikus)	Beépítési hossz igény	Szennyeződés-tűrés	Megjegyzés H_2/H_2-CH_4 esetén	Tipikusan elérhető pontosság
V-cone	Közepes (jó jel/zaj)	10:1–20:1	Rövid	Jó	Kevésbé érzékeny beépítésre; elegyeknél is stabil	0,5–1,0%
Fúvóka (ISA 1932)	Közepes–magas	3:1–4:1	Közepes	Közepes	Magas hőmérsékletre és sebességre alkalmas	0,7–1,2%
Átlagoló Pitot	Alacsony–közepes	4:1–7:1	Rövid	Jó	Szűk helyre alkalmas; kompozíció-korrekció különösen fontos	1,0–2,0%
Wedge	Közepes	4:1–7:1	Rövid	Nagyon jó	Részecskés gázoknál is megbízható, stabil jel	1,0–2,0%

6. A rendszer tervezési lehetőségei és a hidrogénnel kapcsolatos kockázatok

Az elsődleges elem kiválasztását követően a rendszerszintű döntések határozzák meg a mérési lánc felépítését. Hidrogénes alkalmazás esetén az izolációs membrán anyaga és a kapillárisok termikus környezete közvetlen hatással van a nullpont stabilitására és az időállandóra; ezek az alkotóelemek találkoznak elsőként a diffúzió és a gázkiáramlás hatásaival.

A táblázat összefoglalja a különböző konstrukciós lehetőségeket, kiemelve a hidrogénnel kapcsolatos előnyöket és kockázatokat.

2. táblázat Δp -távadó-rendszer kialakítási opciók és H_2 -kockázatok

Rendszerelem	Kialakítás	Előny	Kockázat H_2 közegben	Ajánlott megoldás
Leválasztó membrán	316L; nemesfém-bevonat (Au/Ta)	Ipari kompatibilitás; diffúzió-csökkentés	H_2 -diffúzió buborékképződést okozhat	Aranybevonat kritikus pontokon; minimális holtter
Kapilláris	Rövid, hővédett	Alacsony időállandó	Hőgradiens nullpont-vándorlást okoz	Hőszigetelés; rövidítés; kétoldali szimmetria
Töltőfolyadék	Szilikonolaj, speciális folyadék	Jó hőstabilitás	Gázosodás telítődés után	H_2 -kompatibilis olaj; rendszeres légtelenítés
Tömítések	EPDM, FKM, RGD-minősített	RGD-állóság	Duzzadás, mikropedés	RGD-álló specifikáció; nyomáslépcsők kontrollja
Távadó	Δp -cellás, nagy stabilitás	Alacsony drift, diagnosztika	Hőmérséklet-függő hiba	In-situ kompenzáció; diagnosztikai riasztások

7. Példa egy H_2/CH_4 keverék bizonytalansági költségvetésére

A tervezési döntések végső soron a mérési bizonytalanságban jelennek meg, amelyet előzetesen számszerűsíteni szükséges. Hidrogén–metán keverékek esetén a tömegáram és a sűrűség összetételérzékenysége nemcsak a Δp jelre, hanem az összetételbecslés hibájára is jelentős hatással van. Az alábbi táblázat egy reprezentatív bizonytalansági költségvetést mutat be, amelyet az adott helyszín sajátos körülményeihez kell igazítani.

3. táblázat Példa bizonytalansági költségvetés H_2/CH_4 elegyre

Összetevő	Hozzájárulás ($k=2$)	Megjegyzés
Δp -távadó alap- és hőfokhiba	$\pm 0,20\%$	Gyártói specifikáció szerinti
Primer elem C-tényező	$\pm 0,50\%$	Labor/gyártói kalibráció



Összetevő	Hozzájárulás (k=2)	Megjegyzés
Expanziós tényező ϵ	$\pm 0,20\%$	Kompozíció- és Re-függő
Sűrűség/kompozíció meghatározás	$\pm 0,40\%$	Gázkromatográfia, helyszíni P–T korrekció
Telepítési hatások	$\pm 0,30\%$	Egyenes szakaszok, örvények, kondicionálás
Összesített	$\pm 0,80\text{--}1,20\%$	Tipikus terepi érték H ₂ -elegyre

8. A táblázatok értelmezése és gyakorlati vonatkozásai

A primer elemek összehasonlítása arra utal, hogy hidrogénes alkalmazásban a Venturi- vagy V-kúpos kialakítások gyakran hasznos jelszintnövekedést biztosítanak, miközben az állandó veszteségek mérsékeltek maradnak. Ez különösen előnyös olyan rendszerekben, ahol az áramlás széles tartományban változik, és nagy szabályozási arányra van szükség. A mérőperemek esetében a β -arány megválasztása kritikus: túl magas β -érték túlzott jelcsökkenést okozhat, míg túl alacsony β felesleges állandó veszteséget és zajt eredményezhet. Rendszertervezési szinten a hidrogén diffúziója és a töltőfolyadék gázosodása elsősorban nullpont-eltolódásként jelentkezik. A gyakorlatban ez enyhíthető rövid, hőszigetelt kapillárisokkal, aranyozott membránokkal és jól szellőztethető szerelvényekkel. A modern diagnosztikai rendszerekben elérhető hőmérséklet-kompenzáció és időszakos referenciaellenőrzések lehetővé teszik a lassú drift korai felismerését, így a karbantartás előre tervezhető. A bizonytalansági költségvetés ösztönzi a hibaforrások együttes, nem pedig elszigetelt vizsgálatát.

Hidrogén–metán keverékek esetén különös figyelmet kell fordítani a sűrűsége és a tágulási tényezőre; ezek megbízható gázkromatográfiai adatokkal, valamint a helyi nyomás és hőmérséklet pontos mérésével javíthatók. A rendszeres helyszíni ellenőrzések és a diagnosztikai trendek nemcsak a bizonytalanság csökkentését szolgálják, hanem hozzájárulnak a hosszú távú működőképesség fenntartásához is.

9. Következtetések

Hidrogénes közegekben a Δp -alapú mérés sikerének kulcsa az elsődleges elem és az adórendszer összehangolt tervezése. Az alacsony sűrűségből eredő Δp -csökkenés kezelhető a primer elem és a β -arány optimalizálásával, míg a dinamikai és stabilitási kihívásokra diffúzióálló membránok, rövid szigetelt kapillárisok, hidrogénkompatibilis töltőfolyadékok és fegyelmezett üzemeltetési gyakorlatok nyújtanak megoldást.

Az összetétel-függő korrekció, egy gondosan felépített bizonytalansági költségvetéssel kombinálva, megbízható mérést biztosít mind tiszta hidrogén, mind hidrogén–metán keverékek esetén.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

REFERENCIÁK



- [1] ISO (2003/2007/2019/2022). *ISO 5167-1/-2/-3/-4/-5/-6: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices in full pipes*. <https://www.iso.org/standard/60397.html> (letöltve: 2025. október 30.)
- [2] ASME (2016). *MFC-3M — Measurement of Fluid Flow in Pipes Using Orifice, Nozzle, and Venturi*. <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/mfc-3m> (letöltve: 2025. október 30.)
- [3] API / AGA (2017). *API MPMS Chapter 14.3 (AGA Report No. 3) — Orifice Metering of Natural Gas and Related Hydrocarbon Fluids*. <https://www.api.org/products-and-services/standards> (letöltve: 2025. október 30.)
- [4] AGA (2017). *Report No. 8 (Part 1–2) — Compressibility Factors of Natural Gas and Related Hydrocarbon Gases*. <https://www.aga.org/research/reports/aga-report-no-8> (letöltve: 2025. október 30.)
- [5] JCGM (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)*. <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications> (letöltve: 2025. október 30.)
- [6] CRANE (2018). *TP-410 — Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe (20th ed.)*. <https://www.cranecpe.com/flow-of-fluids> (letöltve: 2025. október 30.)
- [7] Gerzson, M. (Pannon Egyetem). *Áramlásmérés — egyetemi jegyzet (online)*. <http://virt.uni-pannon.hu/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [8] McCrometer (2024). *V-Cone® Flow Meter — Technical Overview & Hydrogen Applications*. <https://www.mccrometer.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [9] Emerson / Rosemount (2023). *Annubar™ Averaging Pitot — Technical Data*. <https://www.emerson.com/en-us/catalog/rosemount-485-annubar> (letöltve: 2025. október 30.)
- [10] Emerson / Rosemount (2025). *3051 / 3051S Differential Pressure Transmitters — Product Data Sheet*. <https://www.emerson.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [11] Endress+Hauser (2024). *Deltabar Differential Pressure — Application Overview (Hydrogen)*. <https://www.endress.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [12] Siemens (2024). *SITRANS P DS III / P320-P420 — Differential Pressure Transmitters (OI & Catalog)*. <https://support.industry.siemens.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [13] ABB (2024). *266 Series — Differential Pressure Transmitters — Data Sheet*. <https://library.e.abb.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [14] Schneider Electric / Foxboro (2024). *IDP10S — Differential Pressure Transmitter (PSS 2A-1S10A)*. <https://www.se.com/us/en/download/document/PSS2A-1S10A/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [15] Yokogawa (2023). *EJX/EJA-E Series — Differential Pressure Transmitters — GS/IM*. <https://web-material3.yokogawa.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [16] WIKA (2023). *Hydrogen permeation on diaphragm seals — Application Note*. <https://www.wika.com> (letöltve: 2025. október 30.)
- [17] Endress+Hauser (USA) (2019). *Why is Hydrogen permeation so destructive to pressure transmitters? (White Paper)*. <https://www.us.endress.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [18] Honeywell (2025). *Hydrogen Permeation — Causes and Prevention (White Paper)*. <https://process.honeywell.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [19] Druck (Baker Hughes) (2024). *Design considerations for choosing a hydrogen pressure sensor*. <https://dam.bakerhughes.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [20] Ashcroft (2025). *How are pressure transducers affected by hydrogen permeation?* <https://ashcroft.eu/how-are-pressure-transducers-affected-by-hydrogen-permeation/> (letöltve: 2025. október 30.)



- [21] Rönnebro, E. C. E.; Oelrich, R. L.; Gates, R. O. (2022). *Hydrogen Permeation Barrier Materials — Review*. *Molecules*, 27(19), 6528. <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/19/6528> (letöltve: 2025. október 30.)
- [22] NAMUR (2017/2025). *NE 107 — Self-monitoring and diagnostics of field devices (overview & revision notes)*. <https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-107-has-been-revised.html> (letöltve: 2025. október 30.)
- [23] IEC (2022). *Overview of IEC 61508 & Functional Safety (brochure)*. <https://assets.iec.ch/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [24] ISO (2011/2022). *ISO 23936-1/-2 — Non-metallic materials in contact with oil & gas media (Thermoplastics / Elastomers)*. <https://www.iso.org/standard/41948.html> (letöltve: 2025. október 30.)
- [25] James Walker (2022). *An introduction to Rapid Gas Decompression (RGD)*. <https://www.jameswalker.biz/knowledge/insights/introduction-to-rgd> (letöltve: 2025. október 30.)
- [26] Parker Hannifin (n. é.). *NORSOK M-710, ISO 23936-2 & API 6A — RGD & sour-gas ageing (ORD-5774)*. <https://www.parker.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [27] PNNL (2022). *Hydrogen permeation barrier materials — publication summary*. <https://www.pnnl.gov/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [28] Fuji Electric (FR) (2024). *Hydrogen Permeation — whitebook (All V5)*. <https://www.fujielectric.fr/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [29] Yokogawa (GS 01C31F01-01EN; 01C31D01-01EN; 01C25B01-01EN, stb.). *EJA/EJX sorozat — nyomás/ Δp transzmittertípusok — GS/IM*. <https://web-material3.yokogawa.com/> (letöltve: 2025. október 30.)
- [30] Siemens (P320/P420). *Operating Instructions & Catalog sheet (incl. remote seal notes)*. <https://cache.industry.siemens.com/> (letöltve: 2025. október 30.)



HŐMÉRSÉKLET-TÁVADÓK HIDROGÉNES KÖRNYEZETBEN: RTD ÉS HŐELEM MEGOLDÁSOK, CSOMAGOLÁS, VÁLASZIDŐ ÉS KALIBRÁLÁS

Ildi Bölkény

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc;

ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hőmérsékletmérés alapvető fontosságú a tiszta hidrogén és a hidrogén–metán keverékek biztonságos és hatékony működéséhez. Az alacsony gázűrűség, a magas hővezető képesség és a polimer anyagok hidrogénben való viselkedése befolyásolja az érzékelő kiválasztását, a csomagolást, a védőcső kialakítását és a kalibrálási stratégiát. Ez a cikk áttekinti az RTD és a hőelem alapelveit, valamint a távadó architektúráját, felvázolja a hidrogénnel kapcsolatos anyag- és tömítési lehetőségeket, leírja azokat a tényezőket, amelyek szabályozzák a válaszdíót áramló gázban védőcsővel, és összefoglalja a kalibrálási és bizonytalansági szempontokat. Két táblázat összehasonlítja az RTD és a hőelem opciókat hidrogénes alkalmazásokhoz, és összefüggésbe hozza a védőcső geometriáját a válaszdíóval.

Kulcsszavak: hőmérséklet-távadók; RTD; hőelemek; termowell-kialakítás; hidrogén hővezetés; válaszdíó és bizonytalanság;

1. Bevezetés

A hidrogén infrastruktúrában a hőmérséklet a biztonsági funkciók, az összenyomhatósági korrekciók és a sűrűségbecslés alapja. Míg az RTD-k és a hőelemek fizikája közegfüggetlen, a hidrogén magas hővezető képessége, az alacsony viszkozitásból adódó áramlási jellemzők, valamint a csomagolásban és tömítésekben használt polimerek viselkedése olyan korlátokat vezet be, amelyek gondosabb tervezést igényelnek, mint a hagyományos földgázszolgáltatás esetén. A cél olyan kiválasztási és üzemeltetési útmutató nyújtása, amely hosszú távú stabilitást, gyors és reprodukálható választ, valamint kimutatható pontosságot biztosít.

2. Érzékelési elvek és távadó architektúrák

Az ellenállás-hőmérők (RTD) a fémek ellenállásának hőmérsékletfüggését használják ki, leggyakoribbak a platina érzékelők, mint például a Pt100 és a Pt1000. A hőelemek elektromotoros erőt generálnak a csatlakozási hőmérséklet-különbségekből; a szabványosított típusok közé tartozik a T, J, K, N, S, R és B. A modern, fejre vagy sínre szerelhető távadók linearizálást, hidegpont-kompenzációt és hőmérsékletfüggő hibajavítást biztosítanak ipari kommunikációs interfészekkel együtt. Hidrogénes üzemben a nedvesített anyagok és csatlakozások megválasztása határozza meg a hosszú távú stabilitást és karbantarthatóságot, míg a vezetékellenállás-kompenzáció és a zajvédelem alakítja a mérési lánc elérhető pontosságát.

3. Csomagolás, anyagok és tömítés



A hidrogénnek kitett házak és nedvesített alkatrészek esetében az ausztenites rozsdamentes acélok általános ipari kompatibilitást biztosítanak. A polimer tömítések jelentik a fő hosszú távú megbízhatósági kockázatot a hidrogénoldhatóság és a gyors gázdekompressziós viselkedés miatt. A megfelelően minősített EPDM és FKM elasztomerek alkalmasak lehetnek, ha a nyomásemelkedések szabályozottak, és a hőmérsékleti tartomány a specifikáción belül marad. A hegesztett csatlakozások és a minimális holtterfogat csökkentik a szivárgás és az anyagkárosodás kockázatát. A kábeltömítések és az elosztódoboz-alkatrészek különös figyelmet érdemelnek, mivel a hidrogén áthatolása gyorsabb lehet, mint földgázos környezetben.

4. Védőcső és válaszdíő

A hőmérséklet-érzékelőket gyakran védőcsövek óvják az áramlás okozta és mechanikai terhelések ellen. Hidrogénes közegben az időállandót a hőtömeg, az áramlási sebesség és a hőátadás együttesen határozza meg. Az L/D arány, a csúcs geometriájának és a falvastagságnak a beállítása lehetővé teszi a 63%-os lépésválasz hangolását a folyamatdinamikához, miközben a rezgés és a potenciális kavitáció elfogadható határokon belül marad. A merülési mélység növelése általában javítja a reprezentativitást, de a hidrogén magas hővezető képessége miatt a vezetőképes hőszivárgás és a környezeti hőmérséklet-grádiensek is jelentősebbé válnak; a végső kompromisszumot a legjobb helyszíni validálással meghatározni.

5. Kalibrálás és bizonytalanság

A kalibrálásnak tükröznie kell a tényleges üzemi hőmérsékletet és áramlási viszonyokat. A négyvezetékes RTD kábelezés minimalizálja a vezetékellenállásból eredő hibát, míg a hőelemek teljesítménye a hidegpont-kompenzáció minőségétől és a referenciaérzékelő stabilitásától függ. A bizonytalansági tényezők közé tartozik az érzékelő elem alap- és hőmérsékletfüggő hibája, a távado linearizációs hibája, a védőcső által indukált hőmérséklet-grádiensek, valamint az áramlási ingadozásokból eredő dinamikus eltérések. A diagnosztikai funkciók – mint például a szakadás- és rövidzárlat-érzékelés, az önellenőrzések és a trendnaplózás – támogatják a megbízhatóságot és a karbantartási tervezést.

6. RTD és hőelem közötti választás hidrogénüzemben

Ez a szakasz azt mutatja be, hogy melyik érzékelőtípus eredményezi a legalacsonyabb kombinált bizonytalanságot a tervezett hidrogénüzemi tartományon belül. A nagy hővezető képesség felgyorsítja a hőátadást, ugyanakkor felerősíti a vezetőképes szivárgási hibákat rövid merülési mélység és nehéz védőcsövek esetén. Ahol a hosszú távú stabilitás és a kalibrálhatóság kiemelkedően fontos – például letéti átadásnál, biztonsági rendszereknél vagy kritikus vezérlésnél –, az RTD-k gyakran előnyösebbek; míg nagyon széles hőmérsékleti tartományok, magas hőmérsékletek vagy gyors tranziensek esetén a hőelemek praktikusabb választást jelenthetnek. A táblázat nemcsak a mérési tartományt és a linearitást emeli ki, hanem az ólomvezeték-ellenállás hatásait és kompenzációját, a hidegpont-kezelés minőségét, valamint a csomagolás hidrogénkompatibilitásának jelentőségét is.

A kalibrálásnak tükröznie kell a tényleges üzemi hőmérsékletet és áramlási viszonyokat. A négyvezetékes RTD kábelezés minimalizálja a vezetékellenállásból eredő hibát, míg a hőelemek teljesítménye a hidegpont-kompenzáció minőségétől és a referenciaérzékelő stabilitásától függ. A

1. táblázat RTD és hőelem összehasonlítása hidrogénes alkalmazásra



Jellemző	RTD (Pt100/Pt1000)	Hőelem (TC, pl. K, T, N)
Mérési elv	Ellenállás hőfüggése platinában	Termoelektromos feszültség két különböző fém között
Tartomány és linearitás	-200...+600 °C, jó linearitás	Széles tartomány, nemlineáris karakterisztika
Pontosság és stabilitás	Magas pontosság, jó hosszú távú stabilitás	Jó robusztusság, referenciafüggő pontosság
Vezetékezés és zajimmunitás	3/4-vezeték előnyös; alacsony jel, jó zajkezelés szükséges	2-vezeték, nagyobb jel; hidegpont-kompenzáció kritikus
Tokozás és anyagok	H ₂ -kompatibilis tokozás és tömítés szükséges	Hasonló követelmények, csatlakozások kritikusak
Alkalmazási megfontolás	Stabil referencia, lassabb válaszdő lehetséges	Gyorsabb válaszdő, szélsőséges hőmérsékletekhez alkalmas

7. Hővédőcső kialakítása hidrogénüzemben

Ez a szakasz ismerteti, hogyan fordíthatók le a folyamatdinamikai követelmények konkrét hővédőcső-paraméterekre. Az időállandót nagymértékben az L/D arány, a csúcs geometriája, a falvastagság és az áramlási sebesség határozza meg; hidrogén esetében a magas hővezető képesség növeli a hőátadási sebességet, míg a vékonyabb kialakítás fokozhatja a rezgés és a kavitáció kockázatát. Az előnyben részesített megoldás eléri a szükséges 63%-os lépésválaszt, miközben a mechanikai gerjesztés elfogadható határokon belül marad; ezt helyszíni ellenőrzésekkel és alátámasztó számításokkal kell megerősíteni.

2. táblázat Termowell-kialakítás és válaszdő kapcsolata hidrogénes közegben

Paraméter	Hatás az időállandóra	Megjegyzés
Bemerülési hossz (L/D)	Növelése általában csökkenti az időállandót	Túl rövid bemerülés növeli a konduktív hiba arányát
Csúcsgeometria	Kúpos csúcs gyorsabb választ ad	A mechanikai szilárdság és rezgésállóság határt szab
Falvastagság	Vastagabb fal lassabb, de erősebb	Hidrogénnél a nagy hővezetés miatt a kompromisszum eltérhet földgáztól
Áramlási sebesség	Nagyobb sebesség gyorsítja a hőátadást	Rezonancia és kavitáció kockázata nőhet
Érzékelő tömege	Nagyobb tömeg lassít	Cserélhető betét optimalizálható kisebb tömegre

8. Értékelés

Az RTD és a hőelemes megoldások közötti választás során egyensúlyt kell találni a pontosság és stabilitás, valamint a válaszdő és a hőmérséklet-tartomány között. A hidrogén magas hővezető képessége elősegíti a gyors hőátadást, ugyanakkor felerősíti a vezetőképes szivárgást, különösen rövid bemerítési mélység és nagyméretű védőcsövek esetén. A csomagolás és a tömítés kompatibilitása határozza meg a hosszú távú működőképességet; a megfelelő anyagválasztást és a szabályozott nyomás–hőmérséklet ciklusokat a modern diagnosztikai rendszerek támogatják. A rendszeres kalibrálás és önellenőrzés segít a mérési láncot a kívánt bizonytalansági tartományon belül tartani.

9. Következtetések

A hidrogénszolgáltatásban a távadó kiválasztása túlmutat az érzékelő elem pusztá megválasztásán. A csomagolási és tömítési koncepciók, a védőcső geometriája, valamint a bemerítési és áramlási feltételek együttesen határozzák meg a válaszdőt és a mérési pontosságot. A jól megválasztott RTD vagy hőelem, a hidrogénnel kompatibilis anyagok és tömítések, a gondos kalibrálás és az aktív diagnosztika együttesen megbízható, stabil hőmérsékletmérést biztosítanak mind tiszta hidrogénben, mind hidrogén–földgáz keverékekben.



KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

REFERENCIÁK

- [1] IEC (2022). *IEC 60751: Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors*. Elérhető online: <https://webstore.iec.ch/en/publication/63753> (letöltve: 2025. október 2.)
- [2] IEC (2022). *IEC 60751:2022*. Elérhető online: <https://cdn.standards.iteh.ai/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [3] IEC (2013). *IEC 60584-1: Thermocouples — EMF reference functions and tolerances*. Elérhető online: <https://webstore.iec.ch/en/publication/2521> (letöltve: 2025. október 2.)
- [4] IEC (2013). *IEC 60584-1 (minta példány)*. Elérhető online: <https://cdn.standards.iteh.ai/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [5] ASME (2016). *PTC 19.3 TW-2016 — Thermowell standard (Wake frequency calculation)*. Elérhető online: <https://www.asme.org/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [6] ASME (2024). *PTC 19.3-2024 — Temperature Measurement (áttekintő)*. Elérhető online: <https://www.asme.org/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [7] NIST (2025). *Thermophysical Properties of Fluid Systems — Hydrogen adatai (λ , c_p , μ , c)*. Elérhető online: <https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [8] NIST (2025). *Hydrogen (CAS 1333-74-0) — WebBook bejegyzés*. Elérhető online: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=1333-74-0> (letöltve: 2025. október 2.)
- [9] Endress+Hauser (2024). *iTEMP TMT72 — HART hőmérséklet-távadó (műszaki információ)*. Elérhető online: <https://bdi-download.endress.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [10] Endress+Hauser (n.é.). *iTEMP TMT82 — termékoldal / adatlap*. Elérhető online: <https://www.endress.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [11] Emerson / Rosemount (2025). *3144P Temperature Transmitter — Product Data Sheet*. Elérhető online: <https://www.emerson.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [12] Emerson / Rosemount (n.é.). *3144P — Reference Manual*. Elérhető online: <https://www.emerson.com/d> (letöltve: 2025. október 2.)
- [13] Siemens (2018). *SITRANS TH320/TH420/TR320/TR420 — Operating Instructions (mA/HART)*. Elérhető online: <https://cache.industry.siemens.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [14] Siemens (n.é.). *SITRANS TH320/420 — termékoldal*. Elérhető online: <https://www.siemens.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [15] WIKA (2023). *T32 digitális hőmérséklet-távadó — adatlap (TE 32.04)*. Elérhető online: https://www.wika.ca/upload/DS_TE3204_en_co_59707.pdf (letöltve: 2025. október 2.)
- [17] ABB (2023). *TTH300 head-mount temperature transmitter — Operating Instructions / Datasheet*. Elérhető online: <https://library.e.abb.com/> (letöltve: 2025. október 2.) [!](#)



-
- [18] ABB (n.é.). *TTH300* — *termékkoldal*. Elérhető online: <https://new.abb.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [19] Yokogawa (2017). *YTA110 Temperature Transmitter — General Specifications (GS 01C50B01-00EN)*. Elérhető online: <https://web-material3.yokogawa.com/GS01C50B01-00EN.pdf> (letöltve: 2025. október 2.)
- [20] WIKA (2018). *Wake frequency calculation per ASME PTC 19.3 TW-2016 — alkalmazási jegyzet*. Elérhető online: https://www.wika.ca/upload/DS_IN0015_en_co_1353.pdf (letöltve: 2025. október 2.)
- [21] Siemens (2023). *Thermowell stress calculation as per ASME PTC 19.3-TW-2016 — útmutató*. Elérhető online: <https://cache.industry.siemens.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [22] Emerson / Rosemount (2014). *White Paper — Thermowell calculations (ASME PTC 19.3-TW)*. Elérhető online: <https://www.emerson.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [23] Emerson (2025). *Thermowell Design Accelerator — online ASME PTC 19.3-TW számító eszköz*. Elérhető online: <https://www.emerson.com/> (letöltve: 2025. október 2.)
- [24] ISO (2011). *ISO 23936-2:2011 — Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production — Part 2: Elastomers*. Elérhető online: <https://www.iso.org/standard/41948.html> (letöltve: 2025. október 2.)
- [25] NORSOK (2001/2024). *M-710 — Qualification of non-metallic sealing materials (áttekintő és ipari összefoglalók)*. Elérhető online: <https://www.barnwell.co.uk/> (letöltve: 2025. október 2.)



NYOMÁSTÁVADÓK HIDROGÉNALKALMAZÁSOKBAN: MÉRÉSI ELVEK, ANYAGVÁLASZTÁS ÉS ÜZEMELTETÉSI ÚTMUTATÓ

Ildi Bölkény

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc;

ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén használata – akár tiszta formában, akár földgázhálózatokba keverve – különleges kihívásokat jelent a nyomástávadók számára. Ez az irodalmi alapú áttekintés összefoglalja a nyomásmérési elvek és a távadó-architektúrák jelenlegi állását, bemutatja a hidrogén fémmembránokon való áthatolásának és a töltőfolyadékok ezt követő gáztalanításának hatásait, valamint tárgyalja az anyag- és bevonási stratégiákat. Kiemeli a tömítőanyag-választás és az üzemeltetési eljárások szerepét, majd reprezentatív termék példákkal illusztrálja a gyártói megoldásokat. Gyakorlati útmutatást nyújt a távadók kiválasztásához és üzemeltetéséhez H₂-szolgáltatásban.

Kulcsszavak: nyomástávadók, hidrogén-permeáció, aranybevonatú membrán, töltőfolyadék-gázosodás, tömítőanyagok

1. Bevezetés

Az energia-gáz és a kapcsolódó dekarbonizációs törekvések egyre gyakrabban vezetnek be a hidrogént a gázinfrastruktúra elemeibe, vagy önálló közegként alkalmazzák. A nyomásmonitorozás a mérési pontokon kulcsfontosságú; a hidrogén sajátos fizikai tulajdonságai – kis atomméret, magas diffúziós és permeációs sebesség, polimerekben való oldhatóság, valamint a gyors gázdekompresszió kockázata – azonban módosítják a nyomástávadók hagyományos kiválasztási szempontjait. A cél olyan mérnöki útmutatás nyújtása, amely biztosítja a pontosságot, a biztonságot és a hosszú élettartamot hidrogénes környezetben.

2. Mérési elvek és távadó-architektúrák

Az ipari nyomásérzékelés jellemzően piezorezisztív, kapacitív, induktív vagy piezoelektromos elveken alapul. A piezorezisztív cellákban a szilícium- vagy fémmembránra integrált nyúlásmérő bélyegek Wheatstone-hidat alkotnak; a kapacitív kialakítások a kis elmozdulásokat kapacitásváltozásként érzékelik; az induktív/LVDT szerelvények a mag mozgását követik; a piezoelektromos elemek a dinamikus nyomást elektromos töltéssé alakítják, és főként gyors transziensekhez, nem pedig statikus mérésekhez alkalmazzák.

A modern távadók általában vékony, hegesztett fémes izolációs membránt használnak, amely a folyamatnyomást egy összenyomhatatlan töltőfolyadékon keresztül továbbítja az érzékelőcellába, leválasztva az elektronikát a közegről, és lehetővé téve az abszolút, a mérő- vagy a tömített mérőreferenciák alkalmazását. A távtömítéssel változtatott kapillárisokat és másodlagos membránokat alkalmaznak, ahol a hőmérsékleti gradiens és a vezeték hossz határozza meg az időállandót és a nulla stabilitását.



A jellánc a távadó fejében végzi a linearizálást és a hőmérséklet-kompenzációt, továbbá konfigurációs, diagnosztikai és próbatesztelési funkciókat biztosít. A szabványos ipari interfészek közé tartozik a 4–20 mA/HART, a Profibus PA, a Foundation Fieldbus, valamint bizonyos esetekben a WirelessHART, amelyet nehezen hozzáférhető helyszínekre alkalmaznak.

A gyártói portfóliók egyre több hidrogénre optimalizált megoldást kínálnak, beleértve a nemesfémekkel (pl. arany vagy tantál) bevont membránokat az áteresztés korlátozására, a hidrogénre minősített nedvesített anyagokat és elasztomereket, valamint a NAMUR NE 107 szabványnak megfelelő kiterjesztett öndiagnosztikai funkciókat a korai driftészlelés érdekében.

3. Hidrogén-specifikus jelenségek és mérési kockázatok

A hidrogén képes áthatolni a vékony fémes izolációs membránokon, és bejutni a távadó töltőfolyadékába. A folyamat során a hidrogén atomos formára disszociál a membrán felületén, belép a kristályrácsba, majd a másik oldalon molekulákká egyesülve oldódik fel a töltőfolyadékban. Telítettség esetén gázbuborékok képződnek, amelyek nullpont- és méréstartomány-eltolódást okoznak, ezáltal rontva a mérési pontosságot; szélsőséges esetekben a membrán mechanikai sérülése is bekövetkezhet. A permeáció sebességét a membrán anyaga és mikroszerkezete, valamint a hőmérséklet és a nyomás befolyásolja. Az ipari gyakorlat a diffúzió mérséklésére nagy diffúziós ellenállású bevonatokat, megfelelő alapanyagokat és minimális holt térfogatokat alkalmaz.

A polimer alkatrészek – például a tömítések – hajlamosak duzzadásra és mikrorepedésekre a hidrogénoldhatóság és a gyors gázdekompresszió miatt. A megfelelő elasztomer kiválasztása, a szabályozott nyomásnövelési és -csökkentési rámpák, valamint a hőmérséklet-szabályozás mérhetően csökkentik a meghibásodás kockázatát. A terepi tapasztalatok jelentős különbségeket mutatnak a tömítőanyagok hidrogénérzékenységében, ami aláhúzza a gyártói minősítések és laboratóriumi tesztek fontosságát.

4. Anyagok és bevonási stratégiák

Az ausztenites 316L rozsdamentes acél gyakori szigetelőmembrán-anyag, amely általános korrózióállóságot és ipari kompatibilitást biztosít. Hidrogénes alkalmazásokhoz a vékony nemesfém-bevonatok – különösen az arany – széles körben elterjedtek, mivel sűrű kristályszerkezetük csökkenti a hidrogénátersztést. A speciális ötvözetek, mint a Hastelloy C-276 vagy a Monel, korróziós előnyöket kínálhatnak; azonban nem feltétlenül biztosítanak alacsonyabb hidrogénpermeációt, ezért eseti alapon kell értékelni őket. A membránon és a nedvesített alkatrészekén túl a tömítőanyagokat alacsony hidrogénoldhatóság és a gyors dekompresszió utáni korlátozott térfogatnövekedés alapján kell kiválasztani; előnyben kell részesíteni az RGD-állóságra minősített elasztomereket. Minden anyag- és bevonatválasztást a tényleges nyomás- és hőmérsékleti tartomány, valamint a várható hidrogéntartalom alapján kell validálni.

5. Működési és kalibrációs szempontok

A nullpont-eltolódás megelőzése a gondos üzembe helyezésen, a rendszeres légtelenítésen, a kapillárisok és holt térfogatok minimalizálásán, valamint az indítási és leállítási nyomástranziensek szabályozásán múlik. A beépített diagnosztikai funkciók – referenciaellenőrzések, drifttrendek és protokollszerű riasztások – lehetővé teszik a



teljesítmény fokozatos romlásának korai felismerését. A kalibrálási gyakoriságnak és a referenciaközegnek tükröznie kell a valós üzemi körülményeket, különösen a nyomást, a hőmérsékletet és a hidrogénarányt.

6. Hidrogénnel alkalmazható nyomástávadók

A táblázat válogatott példákat tartalmaz, amelyek szállítói dokumentáció alapján kerültek összeállításra. A lista inkább tájékoztató jellegű, mintsem teljes körű, és a különböző tervezési megoldások és anyagválasztási lehetőségek mentén mutatja be a legfontosabb kiválasztási szempontokat.

1. táblázat H_2 -kompatibilis nyomástávadók – válogatott példák

Gyártmány	Típus	Nyomásérték / tartomány	Membrán anyaga / opció	Hőmérséklet	Kommunikáció	Hidrogén-alkalmazhatóság	Megjegyzés
Honeywell	STG77L	1–210 bar	316L SS	–	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	$\pm 0,055\%$, választható $\pm 0,04\%$; SIL2/3 opciók.
Honeywell	STG78L	1–420 bar	316L SS	–	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Gyors válaszidő, kiterjedt tanúsítások.
Yokogawa	EJA510E / EJA530E	max. 100 bar	316L / Hastelloy C-276 (Au opció)	$-20 \dots 80^\circ C$	4–20 mA, HART / Fieldbus	H_2 -diffúziót mérséklő opciók	Rezonáns szilícium érzékelő.
Siemens	SITRANS P320 (63 bar)	63 bar	316L/1.4404	–	4–20 mA, HART	100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Távoli SIL-kezelés.
Siemens	SITRANS P320 (400 bar)	400 bar	316L/1.4404	–	4–20 mA, HART	100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Széles tartományú kiépítés.
Schneider Electric	IAP10S	60 bar	316L, aranybevonat	$-20 \dots 50^\circ C$	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	ATEX II 2G IIC Gb T3.
Schneider Electric	IGP10S	220 bar	316L, aranybevonat	$-20 \dots 50^\circ C$	4–20 mA, HART	100% H_2	10 év stabilitás, 5 év garancia.
Schneider Electric	IDP10S	60 bar	316L, aranybevonat	$-20 \dots 50^\circ C$	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	H_2 -alkalmazásra konfigurálható.
FUJI Electric	FKG	130 / 500 bar	Hastelloy, 316L, arany opció	$-40 \dots +85^\circ C$	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Kiterjesztett közegkompatibilitás.
SATRON	VG BPLV700	100 / 250 bar	AISI 316L	–	4–20 mA, HART	100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Benyúlásos kivitel, hegesztett csatlakozás.
ABB	266HSH (arany opció)	~80 bar (példa)	316L, aranybevonat opció	$-20 \dots +85^\circ C$	4–20 mA, HART	100% H_2 opcióval; egyéb kivitelek földgáz és H_2/CH_4	NACE menetek, több tartomány.
Emerson (Rosemount)	3051T In-Line	~275,8 bar (példa)	316L SS	–	4–20 mA, HART	100% H_2 , 100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Alaphiba $\pm 0,04\%$, üzemi összhiba $\pm 0,15\%$.
Nivelco	Nipress DREAF48M	0–100 bar	1.4435	max. $125^\circ C$	4–20 mA, HART	100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Jó ár-érték arány, elegyre validált.
Nivelco	Nipress DREAJ48M	0–400 bar	1.4435	max. $125^\circ C$	4–20 mA, HART	100% földgáz, 2–25% H_2/CH_4	Magasabb tartomány, elegyre validált.

Megjegyzés az adatok forrásáról: Az itt megadott műszaki paraméterek hiteles gyártói adatlapokból, alkalmazási jegyzetekből és termékkatalógusokból származnak (Honeywell, Siemens, Schneider Electric, Fuji Electric, Satron, ABB, Emerson/Rosemount, Nivelco, Yokogawa). A



konkrét értékek termékváltozattól és kiadástól függően eltérhetnek; a végleges kiválasztás előtt javasolt a legfrissebb gyártói dokumentáció ellenőrzése.

7. Értékelés

Hidrogénüzemben két tényező határozza meg a távadó teljesítményét. Az első az izolációs membrán anyaga és bevonata, amelyek a leghatékonyabb védelmet nyújtják a diffúzió okozta hibákkal szemben. A második a polimer alkatrészek viselkedése, amely kritikus szerepet kap az üzemi tranziensek, különösen a gyors nyomáscsökkentések során. A gyártók hidrogénre optimalizált megoldásokkal reagálnak, mint például aranyozott 316L membránok, hidrogénre minősített tömítőanyagok és továbbfejlesztett diagnosztikai funkciók. A kiválasztást a nyomás, a hőmérséklet és a hidrogénfrakció legkedvezőtlenebb kombinációja alapján kell ellenőrizni. A kalibrálási és karbantartási szabályzatok akkor a leghatékonyabbak, ha a tényleges üzemre jellemző körülmények között hajtják végre őket, és ha a beépített diagnosztika integrálva van az eszközzel működési munkafolyamatokba.

8. Következtetések és ajánlások

Hidrogénüzemben a 316L alapú, aranybevonatú membránok széles körben bizonyítottan csökkentik a diffúzió okozta hibák előfordulását. A hidrogénre minősített tömítőanyagok, szabályozott nyomástranziensekkel kombinálva, jelentősen mérséklik az RGD és a duzzadás kockázatát. A gyártói adatok terepi tapasztalatokkal való összevetése és a megbízható kalibrációs gyakorlatok alkalmazása hozzájárul a pontosság és a hosszú távú stabilitás megőrzéséhez. A döntő tényezők továbbra is azok, hogy a közeg tiszta hidrogén vagy hidrogén–metán keverék, illetve hogy milyen az üzemi nyomás-hőmérséklet tartomány. Előnyben kell részesíteni azokat a távadó-kialakításokat, amelyek anyagai, bevonatai és tanúsítványai igazoltan megfelelnek a célzott alkalmazás követelményeinek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázz szállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

REFERENCIÁK

[1] Honeywell (2025). SmartLine ST700 Gauge Pressure Transmitters – product page. Elérhető online: <https://process.honeywell.com/us/en/products/field-instruments/pressure-transmitters/smartline-st700-pressure-transmitters/gauge-pressure-transmitters-smartline-stg700> (letöltve: 2025. október 15.)

[2] Honeywell (2025). Hydrogen Permeation – Causes and Prevention (White Paper). Elérhető online: <https://process.honeywell.com/content/dam/process/en/campaigns/pmc/smartline-solutions-for-hydrogen/documents/hon-ia-pmc-wpr-hydrogen-permeation-a4.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)

[3] Yokogawa (2012; 26th ed. 2025). EJA510E / EJA530E Absolute and Gauge Pressure Transmitters – General Specifications (GS 01C31F01-01EN). Elérhető online: <https://web-material3.yokogawa.com/GS01C31F01-01EN.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)



- [4] Siemens (2024). SITRANS P320/P420 – Operating Instructions (A5E44852162-AF, 03/2024). Elérhető online: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/273/109955273/att_1267115/v1/A5E44852162en_P320P420_HART_OI_en-US.pdf (letöltve: 2025. október 15.)
- [5] Schneider Electric / Foxboro (2024). IAP10S, IGP10S, IDP10S – Advanced Performance Pressure Transmitters (PSS 2A-1S10A). Elérhető online: <https://www.se.com/us/en/download/document/PSS2A-1S10A/> (letöltve: 2025. október 15.)
- [6] Fuji Electric (2023). FCX-A IV Series – FKG Gauge Pressure Transmitter – Data Sheet (E(i)DSX5-105). Elérhető online: <https://www.india.fujielectric.com/hubfs/EiDSX5-105%20.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [7] Fuji Electric (2025). FCX-A IV Series – Differential & Gauge Pressure – Overview Datasheet. Elérhető online: <https://www.ph.fujielectric.com/wp-content/uploads/2025/02/Differential-Pressure-Transmitter.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [8] SATRON (2025). PREON™ VG (BPLV700) Flush-mount Pressure Transmitter – Technical Specifications, Rev. 1.1 (2025-03-28). Elérhető online: https://satron.com/wp-content/uploads/2025/03/VG_BPLV700dle_M4_rev1.1.pdf (letöltve: 2025. október 15.)
- [9] SATRON (2013). VG BPLV700 – Installation and Setting-Up Instructions (BPLV700AV M2 rev.4). Elérhető online: <https://satron.com/wp-content/uploads/2017/10/datasheet-manual-and-display-manual-bplv700av.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [10] ABB (2018). Model 266HSH – Gauge Pressure Transmitter, Low Power (DS_266HSH_LowP-EN_D). Elérhető online: https://library.e.abb.com/public/b29423206ccc40479151a099809582e5/DS_266HSH_LowP-EN_D.pdf (letöltve: 2025. október 15.)
- [11] Emerson / Rosemount (2025). Rosemount™ 3051 Pressure Transmitter – Product Data Sheet 00813-0100-4001 Rev WF (February 2025). Elérhető online: <https://www.emerson.com/documents/automation/product-data-sheet-rosemount-3051-pressure-transmitter-en-73134.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [12] NIVELCO (2020–2022). NIPRESS termékcsalád – adatlapok és kézikönyvek (válogatás). Elérhető online: https://www.nivelco.com/public/files/documents/a3a60fd9-3bfc-485c-9866-3b9bfaeb3c7a/drd8422a0600h_02.pdf és https://www.nivelco.com/public/files/documents/8d92a0fb-d4f7-441d-8a9b-42ffb53cc229/NIVELCO_Product_Catalog_2022.pdf (letöltve: 2025. október 15.)
- [13] NAMUR (2017). NE 107 has been revised – közlemény. Elérhető online: <https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne-107-has-been-revised.html> (letöltve: 2025. október 15.)
- [14] NAMUR (2025). NE 107 – Self-monitoring and diagnostics of field devices (absztrakt, 2025-07-15). Elérhető online: <https://www.namur.net/en/publications/news-archive/ne107-self-monitoring-and-diagnostics-of-field-devices-has-been-revised.html> (letöltve: 2025. október 15.)
- [15] IEC (2022). Overview of IEC 61508 & Functional Safety (brosúra). Elérhető online: <https://assets.iec.ch/public/acos/IEC%2061508%20%26%20Functional%20Safety-2022.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [16] ISO (2011). ISO 23936-2:2011 – Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Non-metallic materials in contact with media related to oil and gas production – Part 2: Elastomers. Elérhető online: <https://www.iso.org/standard/41948.html> (letöltve: 2025. október 15.)
- [17] James Walker (2022). An introduction to Rapid Gas Decompression (RGD). Elérhető online: <https://www.jameswalker.biz/knowledge/insights/introduction-to-rgd> (letöltve: 2025. október 15.)
- [18] Parker Hannifin (2025). NORSOK M-710, ISO 23936-2 & API 6A – RGD és sour-gáz öregítés – technikai összefoglaló (ORD-5774). Elérhető online: <https://www.parker.com/content/dam/Parker-com/Literature/O-Ring-Division-Literature/ORD-5774-NORSOK--ISO--and-API.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [19] Endress+Hauser (2019). Why is Hydrogen permeation so destructive to pressure transmitters? (White Paper WP01105P/24/EN/0119). Elérhető online: <https://www.us.endress.com/> (letöltve: 2025. október 15.)
- [20] Endress+Hauser (2022–2023). Hydrogen permeation in the new hydrogen economy – áttekintő. Elérhető online: <https://endressprocessautomation.com/hydrogen-permeation-in-the-new-hydrogen-economy/> (letöltve: 2025. október 15.)



- [21] Druck (Baker Hughes) (2024). Design considerations for choosing a hydrogen pressure sensor (White Paper). Elérhető online: <https://dam.bakerhughes.com/m/67c5346c96f2ef26/original/Druck-Hydrogen-Sensor-Article-EN.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [22] Ashcroft (2025). How are pressure transducers affected by hydrogen permeation? Elérhető online: <https://blog.ashcroft.com/pressure-transducers-hydrogen-permeation> (letöltve: 2025. október 15.)
- [23] Rönnebro, E. C. E.; Oelrich, R. L.; Gates, R. O. (2022). Recent Advances and Prospects in Design of Hydrogen Permeation Barrier Materials for Energy Applications—A Review. *Molecules*, 27(19), 6528. DOI: 10.3390/molecules27196528. Elérhető online: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/19/6528> (letöltve: 2025. október 15.)
- [24] Endress+Hauser (2024–2025). Measurement technology for hydrogen transportation and storage – application overview. Elérhető online: <https://www.us.endress.com/en/sustainability-solutions/hydrogen-transportation-storage/measurement-technology-hydrogen-transport> (letöltve: 2025. október 15.)
- [25] NAMUR (2025). Work Area 3.1 – General Sensor Technology (NE 107 és kapcsolódó anyagok). Elérhető online: <https://www.namur.net/en/work-areas-and-project-groups/wa-3-field-devices/wg-31-general-sensor-technology.html> (letöltve: 2025. október 15.)
- [26] Barksdale (2024). Pressure sensors and switches for hydrogen applications — Overview. Available online: <https://www.barksdale.de/> (letöltve: 2025. október 15.)
- [27] PNNL (2022). Recent advances and prospects in design of hydrogen-barrier coatings — publication summary. Available online: <https://www.pnnl.gov/publications/recent-advances-and-prospects-design-hydrogen-permeation-barrier-materials-energy> (letöltve: 2025. október 15.)
- [28] Fuji Electric (France) (2024). Hydrogen permeation — product/whitebook (All V5). Available online: <https://www.fujielectric.fr/wp-content/uploads/2024/02/whitebook-product-pressure-measurement-hydrogen-transmitter-permeation-All-V5-en.pdf> (letöltve: 2025. október 15.)
- [29] Yokogawa (2025). Hydrogen permeation — application note/overview. Available online: <https://www.yokogawa.com/th/library/resources/application-notes/hydrogen-permeation/> (letöltve: 2025. október 15.)
- [30] Microsensor (2025). Why does hydrogen pressure measurement matter? — design notes. Available online: https://www.microsensorcorp.com/Details_Why-Does-Hydrogen-Pressure-Measurement-Matter.html (letöltve: 2025. október 15.)
- [31] Alpine Polytech (n.d.). Rapid Gas Decompression (RGD) — overview of test procedures and standards. Available online: <https://alpinepolytech.com/> (letöltve: 2025. október 15.)
- [32] NAMUR (2025). Work Area 3.1 — General Sensor Technology (NE 107 and related resources). Available online: <https://www.namur.net/en/work-areas-and-project-groups/wa-3-field-devices/wg-31-general-sensor-technology.html> (letöltve: 2025. október 15.)



CALIBRATION STRATEGIES FOR O₂, H₂ AND CH₄ GAS AND PRESSURE TRANSMITTERS: METHODS, RISKS, COMPLIANCE

Ahmad Yasser Dakhel^{1*}, Ildi Bölkeny²

^{1*,2} Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc; ^{1*}

dakhel.ahmad.yasser1@uni-miskolc.hu

² ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Abstract

The calibration of O₂, H₂ and CH₄ gas and pressure transmitters requires separate treatment due to their different physical, material, and safety characteristics. The review briefly summarizes the role of bench and in-situ calibration, as well as automated and online condition monitoring; introduces the characteristics of differential pressure transmitters (zero/span, hysteresis, static pressure, and thermal effects), then discusses the calibration gases and critical aspects of oxygen, hydrogen, and methane measurements in a gas-specific manner. Finally, it provides compliance (ISO/IEC 17025; ATEX/IECEx; industry standards) and “best practice” recommendations.

Keywords: pressure transmitter, differential pressure, calibration, O₂, H₂, CH₄, LEL, ATEX, ISO/IEC 17025

1. Introduction

The reliable measurement of gas and pressure transmitters is a key factor in process safety and quality management systems. Due to the different diffusivities, reactivity, and sensor physics of O₂, H₂ and CH₄ gases, calibration strategies cannot be fully standardized. The aim of our short review is to summarize the most important methods and decision points in practice for an engineering audience.

2. Review method

This article is a narrative review based on industry best practices. It summarizes the main calibration steps, tools and checkpoints of pressure transmitters and gas sensors, highlighting hydrogen-specific risks and documentation compliance. The aim is to provide a quick, compact guide.

3. Calibration Procedures

3.1. Bench Calibration

Can be performed in a laboratory environment, relying on standard pressure sources (e.g., deadweight tester) and controlled conditions. The advantage is traceable accuracy and minimized environmental disturbances; the disadvantage is the need to remove the device and shut down. Typical steps: zero and span adjustment, linearity and hysteresis verification, repeatability measurement at multiple points.

3.2. In-situ Calibration

Performed on-site with portable calibrators and communicators (e.g., HART). The advantage is shorter downtime and close-to-process verification; the trade-off is greater environmental uncertainty. Recording of process parameters (temperature, vibration, humidity) is recommended.

3.3. Automated Calibration

Integrated stations with valves, a controlled pressure source, and data acquisition reduce the risk of human error and speed up the cycle. Iterative zero/span trims supported by digital protocols, built-in compensations, and logging are the main advantages.

3.4. Online Condition Monitoring and Interval Management

Real-time drift monitoring (empirical or physical model-based) and statistical decision rules allow calibration intervals to be optimized on a risk basis. Failure rates estimated from historical “as-found/as-left” data and weighted trends are used to determine whether the interval should be extended or shortened.

4. Pressure and Differential Pressure Transmitter Characteristics

In addition to the classic $y = m \cdot x + b$ fit, it is critical for differential pressure transmitters to test the zero and span offset under static pressure and thermal loading. Dual strain gauge (or resonant silicon) architectures are used to compensate for thermal and common-mode disturbances. In practice, the test follows a well-considered sequence: first, the zero point should be checked under closed and open reference conditions, then the span setting at several points — typically 0–25–50–75–100% — in the ramp-up and ramp-down directions. This is followed by the evaluation of hysteresis with ordered ramp-down cycles and uniform loading times. The effect of static pressure should be tested at levels that are permissible but outside the measurement range, while thermal stability should be tested at minimum and maximum operating temperatures, in the settled state.

5. Gas-Specific Calibration Considerations

5.1. Oxygen (O₂)

In practice, electrochemical — cost-effective — or paramagnetic — high-precision — sensors are used for oxygen measurement. The zero point is typically set with nitrogen, and the span calibration is performed with synthetic air (20.9% O₂) or an O₂/N₂ mixture matched to the given range. It is important to take into account the 20.9% oxygen content of ambient air and to recognize that the 0–5% and 20–100% ranges pose different metrological and safety challenges.

5.2. Hydrogen (H₂)

Hydrogen detection is mostly carried out on a thermally conductive or catalytic principle on the LEL scale, while special ppm sensors are used for low concentrations. Due to the high diffusivity and permeation tendency of the medium, the choice of material is critical: in many cases, a gold-plated membrane and a shorter, risk-based calibration interval are justified. The zero point can be set with N₂ or synthetic air, the span with a certified H₂/N₂ mixture (e.g., for a 2% H₂ LEL calibration). The operation must be carried out with increased ventilation, explosion-proof equipment, and regular leak testing.



5.3. Methane (CH₄)

Methane is primarily detected by infrared sensors — in the 3.3 μm band — or catalytically. Zeroing is done with N₂ or synthetic air, and the span with a certified CH₄/N₂ mixture, typically with a concentration of around 2.5% CH₄ ($\approx$ 50% LEL). In terms of material compatibility, standard corrosion-resistant alloys such as Hastelloy C-276 are usually sufficient. In IR measurements, band matching and accurate gas mixtures are key factors.

Summary Note: Electrochemical and paramagnetic sensors are the most common in O₂ measurements; zeroing is usually done with N₂, and span adjustment with 20.9% synthetic air. For H₂, thermally conductive and catalytic technologies dominate, but due to the high diffusivity of the medium, material selection — such as a gold-coated membrane — and a shorter, risk-based calibration cycle are critical. For CH₄, infrared detection provides the best selectivity; calibration is performed with certified CH₄/N₂ mixtures, typically at a concentration around 50% LEL. The main differences can therefore be seen in the sensor physics, the required reference gases, and the material compatibility requirements. A quick overview of the gas-specific differences is summarized in Table 1.

Tables 1 Gas-specific calibration summary (O₂, H₂, CH₄)

Aspect	O ₂	H ₂	CH ₄
Typical detector	Electrochemical / paramagnetic	Thermal conductivity / catalytic (LEL), ppm sensors	IR ($\approx$ 3.3 μm) / catalytic
Zero gas	N ₂	N ₂ or synthetic air	N ₂ or synthetic air
Span gas (typical)	20.9% O ₂ in synthetic air or application-specific mix	Certified H ₂ /N ₂ mixture (e.g., 2% H ₂)	Certified CH ₄ /N ₂ mixture (e.g., 2.5% CH ₄)
LEL reference	—	$\approx$ 4% (in air)	$\approx$ 5% (in air)
Materials/compatibility	—	High diffusivity → gold-plated diaphragm recommended	Standard corrosion-resistant alloys usually sufficient
Key risk	Range-dependent accuracy; 20.9% reference	Flammability, leakage; shorter interval	IR band matching; mixture accuracy
Compliance (examples)	ISO/IEC 17025; ATEX/IECEx	ISO/IEC 17025; ATEX/IECEx; NFPA 2	ISO/IEC 17025; ATEX/IECEx; UL 1484

6. Concluding Remark

Overall, oxygen, hydrogen and methane sensors require distinct calibration strategies due to their different sensor physics, reference gases and material compatibility requirements. Hydrogen-specific diffusivity and permeation risks justify shorter, risk-based calibration cycles, while methane measurements benefit from IR selectivity and accurate span mixtures.

7. Best Practice Checklist

Safe and efficient calibration begins with careful preparation: isolating the process, depressurizing, and checking for leaks. This is followed by a review of the equipment — verifying the availability of traceable standards, certified measuring instruments, a digital communicator, and appropriate connectors. The recommended order of execution is to set the zero point, adjust the range (span), then check linearity and hysteresis; back-checking the zero and span settings is justified due to the interactivity of the trims. Among the environmental effects, temperature and static pressure cannot be omitted, and in the case of hydrogen, explosion protection and targeted ventilation are basic

requirements. Intervals should not be determined on a fixed calendar basis, but rather on risk-based models built on historical drift trends — such as weighted error rates or Poisson processes.

8. Conclusions

Calibration of O₂, H₂ and CH₄ measurements is based on common basic steps, but differs significantly in gas- and sensor-dependent details. The high risks of hydrogen require caution in material selection and operation; IR-based detection of methane requires accurate span mixtures; and for oxygen, the application range and the 20.9% “fresh air” reference should be considered. Documented, traceable bench/in-situ procedures, automated stations, and online condition monitoring together provide the best cost-safety-accuracy compromise.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] ISO (2017). ISO/IEC 17025:2017 — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Available online: <https://www.iso.org/standard/66912.html> (accessed on 10 October 2025)
- [2] European Commission (2014). Directive 2014/34/EU (ATEX) — Equipment for potentially explosive atmospheres. Available online: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/> (accessed on 10 October 2025).
- [3] IEC (2024). IECEx Certified Equipment Scheme — Overview. Available online: <https://www.iecex.com/certified-equipment-scheme/overview/> (accessed on 10 October 2025).
- [4] NFPA (2023). NFPA 2 — Hydrogen Technologies Code. Available online: <https://www.nfpa.org/product/nfpa-2-code/p0002code> (accessed on 10 October 2025)
- [5] UL (2022). UL 1484 — Residential Gas Detectors. Available online: <https://img.antpedia.com/> (accessed on 10 October 2025).
- [6] ILAC/OIML (2022). ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022 — Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment. Available online: <https://ilac.org/> (accessed on 10 October 2025)
- [7] Bean, V. E., et al. (2015). NIST Special Publication 250-39 — Pressure Calibration Service. NIST, Gaithersburg, MD, USA. Available online: <https://nvlpubs.nist.gov/> (accessed on 10 October 2025).
- [8] AMETEK (n.d.). Deadweight Tester — Precision Pressure Measurement Guide. Available online: <https://www.ametekcalibration.com/> (accessed on 10 October 2025).
- [9] Emerson (2018). Material Selection Considerations for Pressure Transmitters (Technical Note). Available online: <https://www.emerson.com/> (accessed on 10 October 2025).
- [10] Yokogawa (n.d.). Hydrogen Permeation — Application Note. Available online: <https://www.yokogawa.com/> (accessed on 10 October 2025).



- [11] Hitachi (2015). Differential Pressure/Pressure Transmitter — General Specifications. Available online: <https://www.hitachi-hightech.com/> (accessed on 10 October 2025).
- [12] Fuji Electric (2025). Hydrogen Pressure Transmitter — Gold-Ceramic Membrane Technology. Available online: <https://www.fujielectric.fr/en/technologies/hydrogen-pressure-transmitter/> (accessed on 10 October 2025)
- [13] Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology*, 24(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>
- [14] Wang, P., Chowdhury, A., & Jiao, J. (2018). Optimised Performance of Non-Dispersive Infrared Gas Sensors for Methane Detection Using Customised Optical Thin Film Bandpass Filters. *Coatings*, 8(12), 472.
- [15] Fu, L., et al. (2023). Enhancing methane sensing with NDIR technology. *Reviews in Analytical Chemistry*, 42(1), e20230062. <https://doi.org/10.1515/revac-2023-0062>
- [16] Bartholomew, C. H., et al. (2020). Flammability Limits of Hydrogen/Air Mixtures — A Review. U.S. DOE/OSTI. Available online: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1721461> (accessed on 10 October 2025).
- [17] NOAA (1992/updated). Methane — CAMEO Chemicals (LEL 5%, UEL 15%). Available online: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8823> (accessed on 10 October 2025).
- [18] Jasek, K., et al. (2022). Paramagnetic Sensors for the Determination of Oxygen. *ACS Sensors*, 7(11), 3123–3143. <https://doi.org/10.1021/acssensors.2c00938>
- [19] Fluke (2025). Calibrating a HART Smart Pressure Transmitter — Application Note. Available online: <https://www.fluke.com/> (accessed on 10 October 2025).
- [20] FieldComm Group (2008). Calibrating HART Transmitters. Available online: <https://www.fieldcommgroup.org/> (accessed on 10 October 2025).

HYDROGEN VS. METHANE: THE EFFECT OF PERMEATION AND CALIBRATION INTERVALS ON THE ACCURACY OF DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTERS — A LITERATURE REVIEW AND EXPERIMENTAL OPPORTUNITY

Ahmad Yasser Dakhel^{1*}, Ildi Bölkeny²

^{1*,2} Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc; ^{1*}

dakhel.ahmad.yasser1@uni-miskolc.hu

² ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Abstract

This study compares how hydrogen and methane influence the accuracy of differential pressure transmitters and the selection of calibration intervals, based exclusively on literature sources. In a unified framework, we review the solution–diffusion model of gas mass transfer, the Arrhenius-like and equilibrium effects of temperature and static pressure, and the material-dependent permeation of membranes and seals. We systematize the literature observations that high diffusivity and permeability in hydrogen can cause increased zero/span run-off and faster drift; therefore, low H₂-solubility liquid fillings and gold-coated or composite membranes are advantageous. In contrast, permeation is typically more moderate for methane, while band matching and mixture accuracy are emphasized for NDIR-based solutions. The article compares the calibration gases and LEL references recommended for the two media, presents the steps of risk-based interval management, and also frames the compliance environment. The literature synthesis is accompanied by a summary table that outlines the main differences and decision-making considerations in a practical form, and the final section describes a low-risk, laboratory-based experimental option — purely conceptual, without empirical results.

Keywords: hydrogen permeation, calibration interval, zero/span drift, gold-plated diaphragm, risk-based maintenance

1. Introduction

The industrial applications of hydrogen and methane are rapidly expanding, which places the accuracy and reliability requirements of measurement systems — especially differential pressure transmitters — at the forefront. The detection and calibration of the two gases cannot be treated uniformly. Hydrogen's exceptionally high diffusivity and small molecular size introduce specific permeation risks, whereas methane presents generally more moderate material compatibility challenges. At the same time, the band matching and mixture accuracy issues of infrared sensing solutions come to the fore. The aim of this study is to systematize these differences based on the available literature and to offer practical guidance for the choice of calibration strategies.

2. Physical Background: Diffusion, Solubility and Permeation

The process is described using the solution–diffusion model: the gas dissolves on the membrane surface (with Henry-type behavior), then diffuses according to Fick's law under the influence of the concentration gradient, and desorbs on the outlet side. The temperature dependence is typically Arrhenius-like; therefore, the activation energy of the tested



materials and the amplitude of the temperature cycles determine the stationary flux and the time constants of the transient behavior. Pressure also affects the equilibrium solubility and the mechanical stresses arising on the membrane, which in extreme cases can cause an increase in microscopic defects and nonlinear drift.

3. Material Selection and Sensor Architecture

When selecting membranes and seals, materials with low solubility and diffusivity towards hydrogen are advantageous. Gold-coated or gold-ceramic composite membranes measurably reduce the hydrogen load on the internal spaces while ensuring adequate mechanical stability. For liquid fillings, the different hydrogen solubility and outgassing dynamics of silicone oils and fluorinated oils deserve special attention; among sealing materials, PTFE-based and high-performance elastomers (e.g., FFKM) represent different compromises in terms of permeation, thermal resistance, and chemical compatibility. The internal architecture of differential pressure transmitters — mechanical symmetry, thermal and static pressure compensation, and digital trim — can compensate for some of the environmental disturbances, but does not eliminate the physical processes of material permeation; therefore, design decisions are paramount for long-term accuracy.

4. Calibration Strategies and Intervals

A key to risk-based interval setting is to quantify the relationship between the drift distribution derived from historical “as-found/as-left” data, process criticality, and compliance limits. A practical approach is to start with shorter, tightly monitored intervals in hydrogen during the introduction phase, while monitoring the zero and span drifts using change detection techniques, such as CUSUM or simple limit rules. If the measured drift remains persistently below the threshold, the interval can be cautiously extended; otherwise, compression and design review are warranted. In the case of methane, experience more often allows for longer initial intervals, provided that thermal and static pressure drifts remain under control.

Table 1 *Effects of H₂ and CH₄ on DP transmitters*

Aspect	Hydrogen (H ₂)	Methane (CH ₄)
Diffusivity / permeation	Very high diffusivity; observable permeation through diaphragms and seals	Lower diffusivity; permeation generally more moderate
Dominant sensing technique	Thermal conductivity or catalytic (LEL); ppm sensors for trace	Infrared (NDIR) or catalytic
Diaphragm & sealing	Gold-plated/composite diaphragm; low-permeation seals preferred	Standard corrosion-resistant alloys and seals usually sufficient
Fill fluid	Prefer low H ₂ -solubility fills; gas-release dynamics critical	Broader range of fill fluids acceptable
Expected drift character	Faster zero/span drift, especially under temperature & static-pressure cycling	More moderate drift; in IR devices, band-matching issues dominate
LEL reference	≈4% (in air)	≈5% (in air)
Typical span mixture	Certified H ₂ /N ₂ mixture (e.g., 2% H ₂)	Certified CH ₄ /N ₂ mixture (e.g., 2.5% CH ₄)
Initial interval guideline	Shorter with tight early surveillance; later relax data-driven	Longer interval often sustainable with continuous trending
Compliance focus	Explosion protection, leak safety, documented traceability of standards	Explosion protection; NDIR band & mixture verification

5. Experimental Option

he proposed concept includes a small-scale, low-risk laboratory protocol that tests identical differential pressure transmitters under hydrogen and methane exposure. The test would quantify the zero and span drift, hysteresis, and short-term stability according to standardized thermal and static pressure profiles, using only certified gas mixtures and traceable standards. The summary table below lists the main variables and possible levels of testing, strictly for conceptual purposes.

Table 2 *Conceptual test matrix*

Variable	Levels / considerations
Medium	Hydrogen (H ₂); Methane (CH ₄)
Diaphragm	Standard corrosion-resistant; gold-plated/composite
Temperature profile	Low–nominal–high operating range with stabilized plateaus
Static pressure profile	Nominal and permitted upper-limit loading
Measurement points	Zero and span checks at multiple predefined points
Output metrics	Zero/span drift, hysteresis, short-term stability
Safety & compliance	Explosion-proof setup, ventilation, certified gas mixtures, detailed logbook

6. Conclusions

Based on the available literature, the increased risk of material permeation in hydrogen requires more conservative calibration of differential pressure transmitters, with shorter intervals and more careful material selection, while in the case of methane, drift is generally more moderate, although thermal and static pressure shifts cannot be neglected. Risk-based interval management and thoughtful diaphragm/seal design are key to maintaining accuracy and compliance in both media.

A limitation of the reviewed literature is the lack of uniform measurement definitions (e.g., drift criteria, stabilization times or environmental conditions). As a result, quantitative comparisons may be uncertain. Future work should apply a harmonized reporting scheme — uniform thermal/static pressure cycles, fixed measurement point order, and “as-found/as-left” data reporting — to enable meta-analysis and the development of more robust interval models.

As a practical consequence, in hydrogen, it is advisable to choose a low H₂-solubility liquid filling and a gold-coated or composite membrane, with initially shorter monitoring cycles, later relaxed based on data; in methane, a longer interval can be maintained if NDIR instruments are regularly monitored for band and mixture accuracy. In both media, online trend monitoring and change detection add value by helping to target the timing of laboratory calibration. The implementation of the low-risk study proposed in the article (Table 2) may be suitable for qualitatively confirming the literature claims and may prepare the ground for introducing a multi-site, standardized protocol.

Overall, the evidence in the literature points in a consistent direction: the management of hydrogen-specific material permeation and data-driven interval management together ensure the sustainability of DP transmitter accuracy, while in the case of methane, the conscious management of the characteristics of the sensing technology (NDIR) leads to reliable, cost-effective operation.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] ISO (2017). ISO/IEC 17025:2017 — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories; ISO: Geneva, Switzerland. Available online: <https://www.iso.org/standard/66912.html> (accessed on 10 October 2025).
- [2] ILAC/OIML (2022). ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022 — Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment; OIML: Paris, France. Available online: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d010-e22.pdf (accessed on 10 October 2025).
- [3] European Parliament and Council (2014). Directive 2014/34/EU (ATEX) — Equipment for explosive atmospheres; EUR-Lex, L 96, 29.3.2014. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0034> (accessed on 10 October 2025).
- [4] IECEx (n.d.). IECEx Certified Equipment Scheme — Overview; IECEx System. Available online: <https://www.iecex.com/certified-equipment-scheme/overview/> (accessed on 10 October 2025).
- [5] NFPA (2023). NFPA 2 — Hydrogen Technologies Code; National Fire Protection Association: Quincy, MA, USA. Available online: <https://www.nfpa.org/product/nfpa-2-code/p0002code> (accessed on 10 October 2025).
- [6] Yokogawa Electric (2022). Hydrogen Permeation — Application Note, AN-P-20220616-02; Yokogawa Electric Corporation. Available online: https://web-material3.yokogawa.com/2/4563/files/AN-P-20220616-02_Hydrogen_Permeation.pdf (accessed on 10 October 2025).
- [7] Yokogawa Electric (n.d.). Hydrogen Permeation — application overview; Yokogawa Electric Corporation. Available online: <https://www.yokogawa.com/us/library/resources/application-notes/hydrogen-permeation/> (accessed on 10 October 2025).
- [8] Fuji Electric (n.d.). Hydrogen Pressure Transmitter — Innovative Gold-Ceramic Membrane Technology; Fuji Electric Europe. Available online: <https://www.fujielectric.fr/en/technologies/hydrogen-pressure-transmitter/> (accessed on 10 October 2025).
- [9] Fuji Electric / ISTECH (2017). Overview — Fuji Electric FCX-All Pressure Transmitters; Product overview brochure. Available online: <https://www.istec.com/wp-content/uploads/2017/07/fuji-pressure-transmitter-overview.pdf> (accessed on 10 October 2025).
- [10] NIST (2009). NIST Special Publication 250-39 — NIST Calibration Services for Pressure Using Piston Gauge Standards; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA. Available online: <https://www.nist.gov/publications/nist-special-publication-250-39-2009-nist-calibration-services-pressure-using-piston> (accessed on 10 October 2025).
- [11] Hodgkinson, J.; Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology*, 24(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/24/1/012004>.
- [12] Wang, P.; Fu, X.; Gibson, D.; Fleming, L.; Ahmadzadeh, S.; Li, C.; Muhiyudin, M.; Song, S.; Hutson, D.; Moodie, D.; MacGregor, C.; Steer, M. (2018). Optimised performance of non-dispersive infrared gas sensors using multilayer thin-film bandpass filters. *Coatings*, 8(12), 472. <https://doi.org/10.3390/coatings8120472>.
- [13] Xu, M.; Wang, X.; Zhou, Z.; Wu, B.; Sun, Y. (2022). Multi-Gas Detection System Based on Non-Dispersive Infrared (NDIR) Spectral Technology. *Sensors*, 22(3), 836. Available online: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/3/836> (accessed on 10 October 2025).
- [14] NOAA (n.d.). HYDROGEN — CAMEO Chemicals. Available online: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8729> (accessed on 10 October 2025).



[15] NOAA (n.d.). METHANE — CAMEO Chemicals. Available online: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8823> (accessed on 10 October 2025).

[16] Stalheim, D.; Boggess, T.; San Marchi, C.; Jansto, S.; Somerday, B.; Muralidharan, G.; Sofronis, P. (2010). Microstructure and mechanical property performance of commercial grade API pipeline steels in high-pressure gaseous hydrogen. In International Pipeline Conference (Vol. 44212, pp. 529–537). ASME. <https://doi.org/10.1115/IPC2010-31301>.

[17] Barrera, O.; Bombac, D.; Chen, Y.; Daff, T. D.; Galindo-Nava, E.; Gong, P.; Haley, D.; Horton, R.; Katzarov, I.; Kermode, J. R.; et al. (2018). Understanding and mitigating hydrogen embrittlement of steels: a review. *Journal of Materials Science*, 53, 6251–6290. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1978-5>.

[18] Wijmans, J. G.; Baker, R. W. (1995). The solution–diffusion model: a review. *Journal of Membrane Science*, 107(1–2), 1–21. (Abstract/record) Available online: https://onsearch.library.northeastern.edu/.../10_1016_0376_7388_95_00102_I (accessed on 10 October 2025).

ONLINE CONDITION MONITORING AND RISK-BASED CALIBRATION INTERVAL OPTIMIZATION FOR PRESSURE TRANSMITTERS — A LITERATURE REVIEW AND FUTURE EXPERIMENTAL RECOMMENDATIONS

Ahmad Yasser Dakhel^{1*}, Ildi Bölkeny²

^{1*,2} Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc; ^{1*}

dakhel.ahmad.yasser1@uni-miskolc.hu

² ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

Abstract

This article provides a literature-based overview of online condition monitoring for drift detection in pressure and differential pressure transmitters, and of risk-based strategies for optimizing calibration intervals. Within an integrated framework, we examine the range of engineering signals and diagnostic indicators (as-found/as-left trends, zero/span shifts, thermal and static pressure displacements), statistical and machine learning-based detectors (limit rules, EWMA/CUSUM, Kalman filtering and Bayesian estimation, degradation models), uncertainty management, and compliance considerations. We summarize decision-making strategies that allow calibration intervals to be aligned with actual drift risk while meeting the requirements of ISO/IEC 17025 and hazardous area regulations. The final section outlines a conceptual proposal for future low-risk pilot testing; no empirical data are presented.

Keywords: online condition monitoring, calibration interval optimization, risk-based maintenance, drift detection

1. Introduction and Objective

Calibration scheduling is a key element of process safety and quality assurance. However, fixed calendar-based intervals do not necessarily reflect the actual risk of drift. The aim of online condition monitoring and risk-based decision-making is to align calibration timing with the instrument's condition and the criticality of the process. This paper synthesizes the available literature to provide a practical overview of the strengths, limitations, and auditability of the methods.

2. Conceptual Framework and Definitions

Condition monitoring refers to the continuous or periodic sampling of transmitter outputs and relevant environmental variables. Its aim is the early detection of drift or other faulty conditions. Risk-based interval optimization is a decision-making approach that seeks to balance the cost of calibration against the risk of erroneous measurements. Risk may arise from exceeding accuracy specifications or compromising a process safety limit (SIL/PL); therefore, explicit management of uncertainties and consequences is essential.

3. Signals, Characteristics, and Uncertainty

The literature typically describes drift in terms of zero and span shifts, hysteresis, degradation of repeatability, and compensation errors caused by temperature and static pressure. Valuable sources of information include time series of



as-found/as-left calibration pairs, trends in process signals, digital self-checks (e.g., diagnostics, sensor health), and environmental sensor data. The uncertainty budget is determined by the signal-to-noise ratio, sampling frequency and the underlying model assumptions. A limitation in the literature is the lack of consistent units and reference states, which complicates comparability.

4. Drift Detection and Condition Estimation: Methodological Overview

The simplest approach is the deterministic threshold rule, which compares key indicators (e.g., zero shift) to predefined limits. Among change detection methods, EWMA and CUSUM are sensitive to small, cumulative shifts, while Kalman filtering and Bayesian condition estimation are suitable for separating drift from measurement noise—especially when the effects of thermal and static pressure are modeled using regression components.

Machine learning techniques—such as supervised classifiers and anomaly detectors—perform reliably when representative training data are available, provided that their decision pathways remain sufficiently explainable for audit purposes. The choice of method depends on the time constant of the phenomenon, the tolerance for false alarms, and the level of auditability required.

5. Risk-Based Interval Decision-Making

Interval optimization hinges on a decision rule that recommends extending or shortening the interval based on the probability of drift and the severity of its consequences. A common strategy is to begin with a conservative, short interval during the initial implementation phase, then gradually extend it based on the frequency of as-found errors, CUSUM/EWMA signals, and process criticality. In parallel, a compliance narrative must be maintained: decisions must be based on traceable, documented data and the results of calibrations performed with accredited standards.

6. Compliance, Auditability, and System Integration

Successful implementation hinges on the integrity of the data chain and a reproducible decision-making process. The collection, time-stamping, and version-controlled storage of signals, along with the metadata of calibration certificates and the decision log, together form the auditable system. The parameterization and any changes to the condition monitoring algorithms must also be documented. In the case of risk-based interval extensions, approval by a qualified person and the documentation of a recovery plan are particularly important.

7. Summary

The following table summarizes the online condition monitoring methods most frequently discussed in the literature, along with the required data, expected strengths and limitations, and auditability considerations. Method selection should be based on the available data infrastructure (e.g., sampling frequency, environmental logs), tolerance for false alarms, and the level of explainability required for auditors. In simple environments, the threshold rule is transparent and defensible; EWMA and CUSUM are well-suited for detecting small, gradual shifts; while Kalman/Bayesian estimators and regression/physical models offer stable performance for noisy or strongly temperature/pressure-dependent signals.



In critical applications, combining methods (e.g., threshold + CUSUM, Kalman + regression) can reduce false alarm rates while preserving early sensitivity and auditability.

Table 1 *Online supervision methods and decision rules (literature synthesis)*

Method	Required data	Strength	Limitation	Auditability
Threshold rule	Periodic zero/span checks, environmental logs	Simple, transparent	Insensitive to small drifts	Excellent
EWMA/CUSUM	Continuous indicator time series	Early sensitivity to small shifts	Parameter tuning required	Good
Kalman/Bayesian filtering	Sensor and environmental time series	Separates noise/drift; enables prediction	Sensitive to model assumptions	Good
Regression/physical model	Temperature/pressure profiles and transmitter output	Causal relations interpretable	Model building is labor-intensive	Good–excellent
ML anomaly detection	Multichannel, labeled datasets	Detects complex patterns	Data-hungry; limited explainability	Moderate

8. Future Pilot Recommendation

A low-risk pilot is proposed to validate the findings from the literature, with the sole purpose of testing the methodology. The concept involves recording the time series of zero/span indicators and environmental variables online for a small group of instruments. Using a predefined decision rule—such as an EWMA threshold—the pilot would assess whether a single interval extension can be justified. The study would not disclose any product or process data and would not impact safety margins; its sole objective would be to evaluate the auditability and operability of the decision-making procedure.

Table 2 *Conceptual Pilot*

Variable	Description
Instrument cohort	5–10 DP transmitters, same model/type
Observation window	3–6 months, daily sampling
Indicators	Zero/span deviation, hysteresis proxy, temperature/pressure profile
Decision rule	EWMA/CUSUM threshold with conservative alert logic
Outputs	Interval recommendation, false-alarm rate
Documentation	Decision log, traceable standards, “as-found/as-left” pairs

9. Conclusions

The literature on online condition monitoring and risk-based interval management provides a mature methodological toolkit for detecting drift in pressure transmitters and fine-tuning calibration schedules. Successful practical implementation depends on the quality of available data and on the explainability of the chosen method. It also requires the ability to ensure auditable and traceable decision-making. The purpose of the proposed low-risk pilot is not to generate empirical evidence, but to validate the decision framework and to facilitate the smooth development of compliance documentation.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] ISO (2017). *ISO/IEC 17025:2017 — General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*; ISO: Geneva, Switzerland. Available online: <https://www.iso.org/standard/66912.html> (accessed on 20 October 2025).
- [2] ILAC/OIML (2022). *ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022 — Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment*; ILAC & OIML. Available online: https://www.oiml.org/en/files/pdf_d/d010-e22.pdf (accessed on 20 October 2025).
- [3] ISO (2018). *ISO 17359:2018 — Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*; ISO: Geneva, Switzerland. Available online: <https://www.iso.org/standard/71194.html> (accessed on 20 October 2025).
- [4] ISO (2025). *ISO 13379-1:2025 — Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Data interpretation and diagnostics techniques — Part 1: General guidelines*; ISO: Geneva, Switzerland. Available online: <https://www.iso.org/standard/88027.html> (accessed on 20 October 2025).
- [5] JCGM (2008). *JCGM 100:2008 — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM 1995 with minor corrections)*; BIPM: Sèvres, France. Available online: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (accessed on 20 October 2025).
- [6] NIST (1994). *NIST Technical Note 1297 — Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*; NIST: Gaithersburg, MD, USA. Available online: <https://www.nist.gov/pml/nist-technical-note-1297> (accessed on 20 October 2025).
- [7] IEC (2016). *IEC 61511-1:2016 — Functional safety — Safety instrumented systems for the process industry sector — Part 1: Requirements*; IEC: Geneva, Switzerland. Available online: <https://webstore.iec.ch/en/publication/24241> (accessed on 20 October 2025).
- [8] Lucas, J. M.; Saccucci, M. S. (1990). Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements. *Technometrics*, 32(1), 1–12. Available online: <https://www.stat.cmu.edu/technometrics/90-00/vol-32-01/v3201001.pdf> (accessed on 20 October 2025).
- [9] Page, E. S. (1954). Continuous Inspection Schemes. *Biometrika*, 41(1–2), 100–115. <https://doi.org/10.1093/biomet/41.1-2.100>
- [10] Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35–45. Available online: <https://courses.cs.duke.edu/compsci527/cps274/fall11/papers/Kalman60.pdf> (accessed on 20 October 2025).
- [11] Dao, P. B. (2021). A CUSUM-Based Approach for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Wind Turbines. *Energies*, 14(11), 3236. <https://doi.org/10.3390/en14113236>
- [12] Knoth, S.; Saleh, N. A.; Mahmoud, M. A.; Woodall, W. H.; Tercero-Gomez, V. G. (2021). A Critique of a Variety of “Memory-Based” Process Monitoring Methods. *arXiv* 2110.10680. Available online: <https://arxiv.org/abs/2110.10680> (accessed on 20 October 2025).
- [13] ISO (2016). *ISO 14224:2016 — Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*; ISO: Geneva, Switzerland. Available online: <https://www.iso.org/standard/64076.html> (accessed on 20 October 2025).
- [14] Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to Statistical Quality Control*, 7th ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. (Book overview) Available online: <https://www.wiley.com/en-ie/Statistical%2BQuality%2BControl%3A%2BA%2BModern%2BIntroduction%2C%2B7th%2BEdition%2BInternational%2BStudent%2BVersion-p-9781118531372> (accessed on 20 October 2025).





SEMI-AUTOMATED PRESSURE TRANSMITTER CALIBRATION WITH INSTRUMENT-LEVEL GPIB CONTROL AND REPORT INTEGRATION

Zsófia Forgács

University of Miskolc, Institute of Automation and Infocommunication; zsofia.forgacs@uni-miskolc.hu

Abstract

Pressure transmitters are key components in industrial measurement systems, and their performance must be periodically verified in accredited laboratories. Traditional calibration workflows rely on full operator control to set pressure levels, wait for stabilization, acquire electrical output signals, and manually enter measurement data into official calibration reports. These actions increase total calibration time and introduce potential transcription errors, particularly when multiple loading and unloading cycles are required. To address these issues without altering the accredited metrological evaluation process, this work presents a semi-automated calibration system that controls GPIB-capable reference instruments and directly transfers measurement data into the validated Excel-based calibration template. The proposed implementation significantly reduces operator involvement during the measurement phase while ensuring that all metrological calculations remain traceable to the original accredited workflow. Experimental use in a laboratory environment demonstrated reduced calibration time and complete elimination of manual data-entry errors, without any change in the computed uncertainty or conformity assessment.

Keywords: instrument control, metrology, pressure transmitter calibration, GPIB, Python

1. Introduction

The automation of measurement tasks in industrial laboratories has become increasingly important due to growing demands for traceability, higher production capacity, shorter cycle times, and reduced human error. Pressure transmitters are fundamental components of industrial control systems, forming the primary sensing elements responsible for monitoring and regulating pressure in gas transmission networks, process industries, and safety-critical infrastructure [1-3]. Traditionally, the calibration of industrial pressure transmitters relies on manual interaction with calibration equipment, including pressure generators and reference meters, followed by manual data entry into accredited laboratory templates. Although this workflow ensures traceable results, the significant involvement of the operator introduces time consumption, potential data-entry mistakes, and increased uncertainty associated with human factors.

To address these challenges, the present work focuses on the development of a semi-automated calibration system that integrates instrument communication, measurement sequencing, and automatic data transfer into accredited calibration reports. The developed software interacts directly with reference equipment via GPIB communication, controls pressure loading cycles, acquires measurement data, and performs error-free integration into the official Excel-based certificate template used by the laboratory. By automating the repetitive and error-sensitive steps of the calibration workflow, the proposed solution improves measurement efficiency while fully preserving accredited



evaluation procedures and uncertainty calculations [4, 5]. The results demonstrate that laboratory throughput can be increased without altering the certified metrological framework, making the method suitable for industrial-scale deployment and future extensions toward fully automated calibration.

2. Materials and methods

The developed calibration system automates instrument control and data transfer for laboratory calibration of industrial pressure transmitters. The solution combines software-driven communication with reference equipment and automatic integration into the accredited calibration report, while leaving all metrological calculations to the certified documentation.

2.1. Measurement System Architecture

The calibration system is based on a computer equipped with a USB–GPIB interface, controlling two reference instruments capable of GPIB communication. A GE PACE digital pressure calibrator functions simultaneously as the pressure source and the reference standard, while a Keithley digital multimeter measures the electrical output of the pressure transmitter. In accordance with the accredited laboratory procedure, the transmitter’s 4–20 mA output signal is not measured directly as current; instead, it is converted into a voltage signal through a precision shunt resistor connected in series with the power supply and the transmitter output. The resulting voltage drop is measured by the reference multimeter and is used as the basis for evaluating the output of the device under test.

Thus, the measurement system consists of three metrologically relevant components:

1. the pressure calibrator acting as the etalon,
2. the digital multimeter measuring the voltage across the standard resistor, and
3. the shunt resistor itself, which enables voltage-based comparison of the transmitter’s output.

This configuration enables the comparison between the ideal transfer characteristic of the transmitter and its actual response.

In accordance with the accredited procedure, multiple observations are performed at identical pressure points, while intermediate pressure values are applied between repeated measurements. This approach reduces hysteresis and memory effects arising from loading direction and mechanical elements. Before each observation, sufficient stabilization time must be ensured for the pressure system and the transmitter output. The recorded values serve as the input for metrological evaluation, during which the calibration report determines the mean error and expanded uncertainty based on the etalon certificates, the necessary corrections, and a Type B uncertainty assessment [6].

The developed software does not alter the calibration method or the metrological evaluation. It automates pressure setting, loading and unloading cycles, stabilization control, and measurement acquisition from the reference multimeter. The collected data are inserted directly into the accredited Excel-based calibration report, while all computations, including corrections, ideal value calculation, error evaluation, and expanded uncertainty estimation, remain exclusively within the certified template. As a result, the system complies with accreditation requirements while significantly improving the speed of execution and eliminating operator-induced data entry errors.

2.2. Software Architecture

The control software used in the calibration system was developed in Python with a modular structure that separates instrument communication, measurement control, data acquisition, and report integration. The GPIB communication module handles command transmission to the GE PACE pressure calibrator and the Keithley multimeter, as well as the reception of measurement data from both reference instruments. A dedicated measurement control unit manages the execution of the loading cycles, including the reaching of pressure setpoints, the implementation of loading and unloading directions, and the supervision of stabilization intervals.

Data acquisition is performed by a separate module that records the voltage values measured by the multimeter only after a predefined stabilization period. This ensures that the registered values reflect stable conditions rather than instantaneous fluctuations, consistent with the requirements of the accredited calibration procedure. After acquisition, the recorded values are transferred through a specialized interface directly into the appropriate fields of the certified Excel-based (.xslm) calibration report, specifically into the report worksheet used by the laboratory [6].

Crucially, the control software is limited to instrument automation and data transfer. It does not modify, recompute, or replace any part of the metrological evaluation carried out by the accredited laboratory. All calculations, including corrected and ideal values, error determination, and the evaluation of expanded uncertainty and conformity, remain solely within the certified macros and formulas embedded in the calibration report. In this manner, the software automates the manual operations of the calibration workflow while fully preserving the integrity of accredited computational methods and documentation processes.

2.3. Automated Calibration Workflow

The automated calibration process begins with the operator preparing the measurement setup by connecting the pressure transmitter to the pressure calibrator and the electrical measurement chain, and by providing the required power supply. Once the physical system is configured, the control software assumes full process execution. Table 1 summarizes the calibration steps and the application's corresponding roles.

Table 1 *Summary of calibration steps and the application's role*

Calibration Step	Description	Performed On	Role of the Application
Connection of reference and DUT	Pneumatic connection of pressure line. Electrical wiring	Physical calibration station	-
Pressure setting	Stepping through measurement points (e.g. 0–25–50–75–100%), according to loading direction	GE PACE pressure calibrator	GPIB control of pressure setpoints
Stabilization wait	Time delay + monitoring pressure change rate	Software screen + PACE feedback	Time-controlled wait; optional stability check
Signal acquisition	DMM measures voltage corresponding to 4–20 mA	Keithley digital multimeter	Reads measured value via GPIB
Cycle repetition	Loading → intermediate point → unloading, repeated	Controlled by software	Automated sequencing and direction control
Measurement data entry	Recording calibrated points	Excel report	Automatic cell population
Reference corrections	Interpolation + reference uncertainties	Excel macros & formulas	Software does not compute



Correct value calculation	Ideal transfer + corrections applied	Excel formulas	Not computed or modified by app
Error, linearity, hysteresis	Comparison of loading/unloading and curve deviation	Excel formulas	Not computed or altered by app
Uncertainty evaluation	Expanded uncertainty ($k=2$)	Excel macros & formulas	Not computed or modified by app
Compliance statement	"Pass / Fail" according to accredited criteria	Excel	Not overridden by app

Based on the specified pressure points, the software generates the desired pressures by controlling the GE PACE calibrator, executes the loading and unloading sequences, and ensures a stabilization period at each measurement point. After stabilization, the voltage drop across the precision shunt resistor representing the transmitter's 4-20 mA output signal, is automatically acquired from the Keithley digital multimeter.

In accordance with the accredited calibration procedure, repeated observations are performed at identical pressure points, each preceded by the application of an intermediate pressure level. This approach mitigates hysteresis and mechanical memory effects. The number of repeated cycles, the stabilization duration, and the pressure setpoints are defined by the operator through the user interface and are subsequently executed by the software without further operator intervention. When the measurement cycle is complete, the recorded values are automatically transferred into the designated cells of the certified Excel-based calibration report, where all computation and conformity evaluation are carried out exclusively by the embedded formulas and macros.

Thus, the software does not modify the calibration method or any metrological calculations. It automates only instrument control, measurement data acquisition, and the transfer of data into the accredited report. As a result, the calibration procedure becomes faster and eliminates operator-induced transcription errors while fully preserving traceability and compliance with accredited laboratory requirements.

3. Results and discussion

The following section presents the results of the developed semi-automated calibration system, focusing first on the achieved functional capabilities and then on the implementation-specific aspects of the software architecture.

3.1. Functional Results of the Semi-Automated Calibration Application

The application performs the core steps of the pressure transmitter verification workflow by integrating validated laboratory procedures with automated instrument control and error-free data transfer. The system communicates with both the reference pressure generator and the reference multimeter via GPIB, retrieves the measurement setpoints directly from the accredited Excel template, and executes the loading and unloading cycles according to the calibration standard.

During pressure stabilization, the application does not rely on predefined waiting times; instead, it continually monitors the instrument's internal status register and proceeds only when the pressure controller declares a stable setpoint. This state-based approach eliminates unnecessary delays while ensuring full compliance with the traceable metrological procedure. After stabilization, the software acquires voltage samples from the multimeter, computes their statistical

parameters, and writes both raw and processed values into a temporary measurement file, from which the relevant results are transferred to the accredited calibration certificate without allowing user modification.

By automating only the controllable and repetitive tasks (instrument communication, measurement sequencing, and validated data transfer) the developed application reduces human workload and transcription errors while fully preserving the accredited uncertainty calculation, correction formulas, and decision rules embedded in the laboratory's Excel template.

3.2. Software Architecture Overview

The developed calibration system is implemented as a modular software application, where each component represents a distinct stage of the pressure transmitter calibration workflow. The architecture follows a strict separation of responsibilities: instrument communication, measurement control, data handling, and report integration are performed by independent backend modules, while the user interface acts only as a supervisory control layer without affecting accredited metrological calculations. Figure 1 shows the architecture of the application.

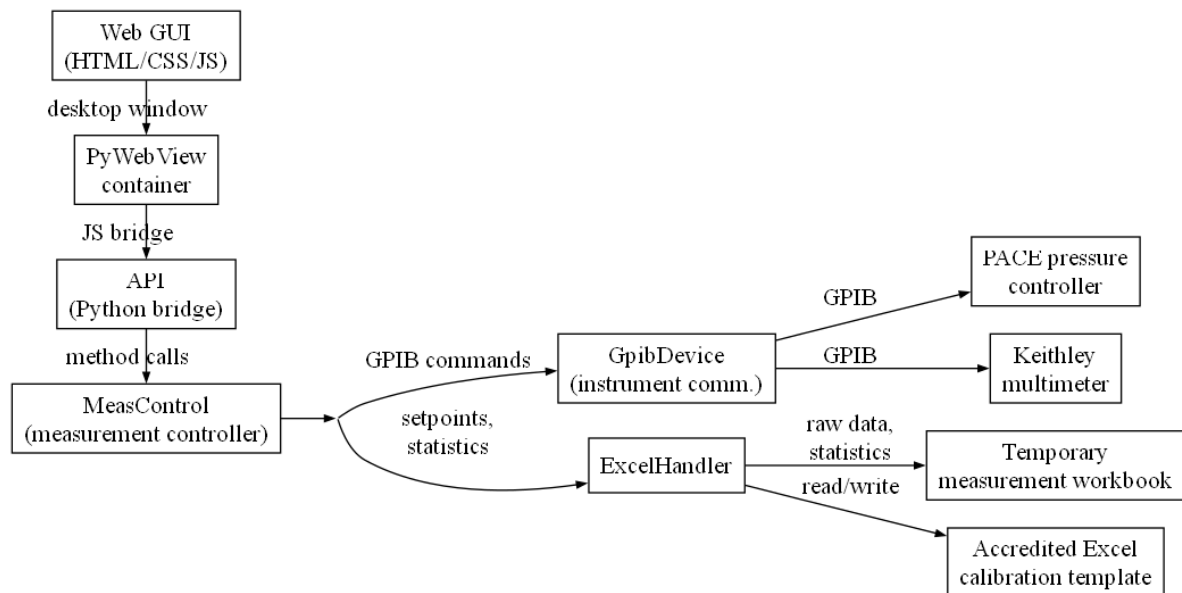


Figure 1 *Software architecture of the calibration system*

At the core of the system, the Measurement Control module operates as a finite-state controller that executes the programmed calibration sequence. It sets reference pressures, waits for stabilization, manages loading/unloading cycles, and acquires measured voltage values from the transmitter output. All communication with laboratory instruments is encapsulated in the Instrument Communication module, which abstracts device-specific SCPI commands and GPIB communication details. This encapsulation ensures hardware independence and allows reference devices to be replaced without modifying higher-level software logic.

Collected data are managed by the Excel Handler, which reads setpoints from the officially validated calibration template, creates a separate measurement file for raw data storage, and transfers only validated statistical results back into the accredited calibration report. This guarantees full traceability and prevents any modification of certified formulas, uncertainty propagation, or acceptance criteria.

Finally, a browser-based graphical user interface, generated via a Python webview engine, provides real-time visual feedback on measurement progress, instrument connection status, and operator-defined parameters. The frontend (HTML/JavaScript) can initiate actions and display backend log messages but has no access to any functions that could alter metrological evaluation. As a result, the architecture enables partial automation while fully preserving compliance with regulated calibration workflows.

3.3. Calibration Sequence Execution

The developed application executes the pressure transmitter calibration procedure as a threaded, event-driven sequential controller. Instead of a fixed state machine, each phase of the workflow is initiated via GUI events and executed in independent background threads. These threads communicate with laboratory instruments using synchronous GPIB commands and acquire data only after the reference pressure generator confirms stable regulation. This approach ensures traceability and operator supervision without compromising accredited laboratory procedures. The class diagram of the developed application is shown in Figure 2.

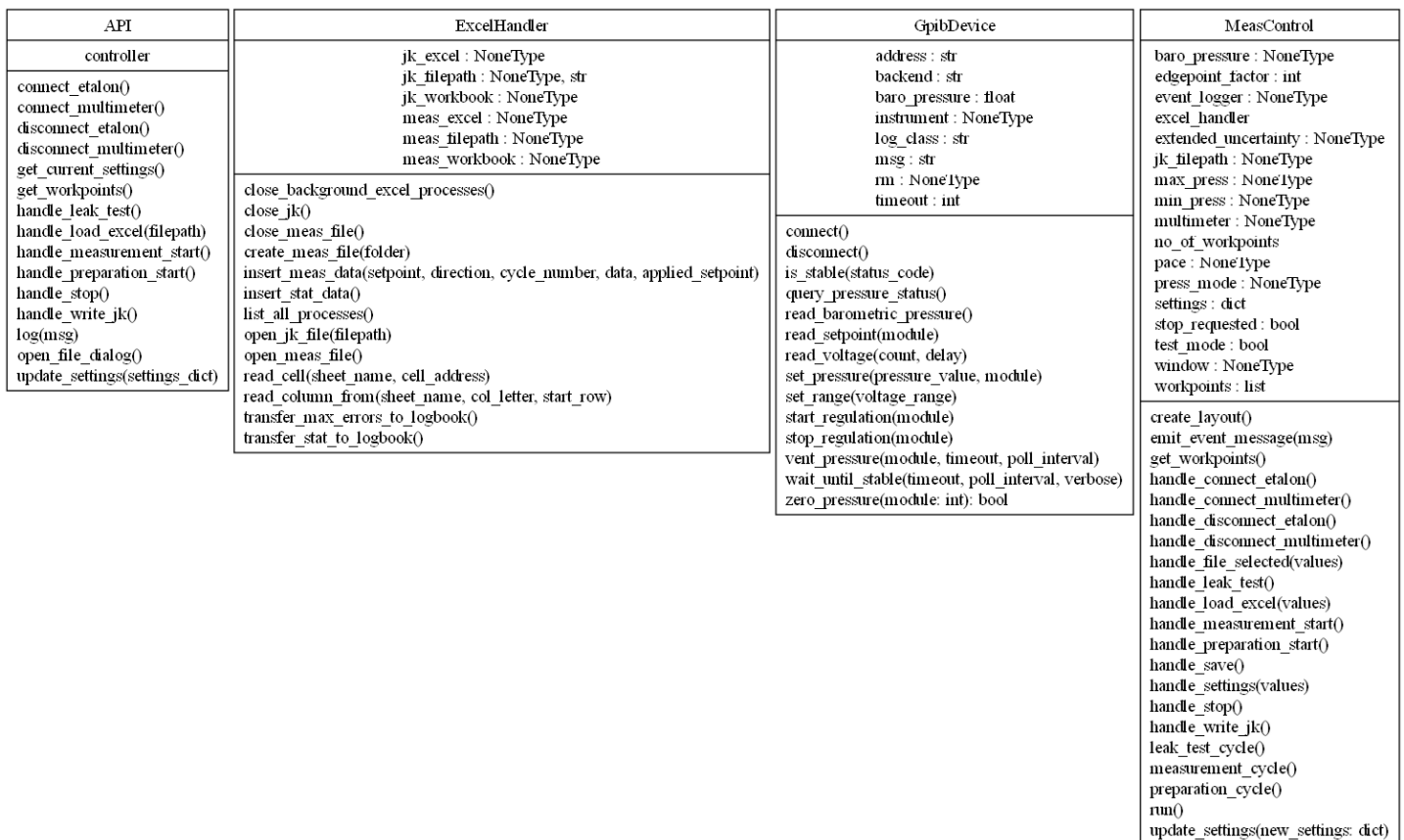


Figure 2 Class diagram of the application

1. Leak Test Sequence: The leak test is performed exclusively at the highest setpoint extracted from the accredited Excel certificate. After connecting to both instruments, the software sets the pressure, starts regulation, and waits for stability. Once stabilized, the regulation is stopped and two independent multimeter samples are taken 30 seconds apart. The difference between these readings is compared to the laboratory's predefined leakage limit. If the threshold is exceeded,

the software reports a failed leak test through both the backend logger and the GUI, preventing further measurement steps.

2. Preparation (Pre-Cycling) Sequence: Before the actual measurement sequence, the system executes alternating loading and unloading cycles to minimize hysteresis. The maximum and minimum pressures are read from the certified Excel template, and the reference generator cycles between these values. Although pressure stabilization is checked using the instrument's internal status register, the laboratory workflow also requires fixed post-stabilization wait times, which remain intentionally time-based. This hybrid stabilization approach preserves compliance with existing accredited procedures while reducing unnecessary operator interaction.

3. Measurement Sequence: During the measurement phase, the application:

1. Reads the pressure mode (gauge/absolute) from the reference device.
2. Creates a temporary measurement workbook, ensuring formulas in the accredited certificate remain untouched.
3. Executes three full cycles of loading and unloading, applying all setpoints retrieved from the official Excel document.
4. Performs dynamic edge-point handling, where:
 - gauge mode compares results against near-zero pressure,
 - absolute mode compares against measured barometric pressure,
 - a conditional zeroing procedure is triggered if the uncertainty-based threshold from the accredited template is exceeded.
5. Triggers conditional pre-boosting for the downward direction, stabilizing the pressure above the target before lowering it to prevent sudden pressure drops at the first step.
6. Collects multimeter samples, based on user-defined count and delay parameters, and saves raw values directly into the measurement workbook.

Once all setpoints are processed, the software automatically generates statistical results and transfers only validated values into the accredited Excel report. The calculation formulas, uncertainty propagation, and acceptance criteria embedded in the certified template remain locked and cannot be modified by the operator or the application.

3.4. User Interface and Supervisory Control

The operator interacts with the calibration system through a browser-based graphical interface embedded in a local Python WebView container. The frontend, implemented in HTML/CSS/JavaScript, communicates with the backend through a restricted API that exposes only high-level control commands, ensuring that accredited calculations remain inaccessible from the user interface.

The GUI is divided into five workflow-oriented views: Home, Connection, Settings, Control, and Report. The Connection view handles GPIB addressing and instrument connection tests, the Settings view provides configurable measurement parameters such as cycle count, delays and leak limits, with validation before execution. The Control view initiates leak testing, pre-cycling and measurement sequences, while displaying real-time event logs from the backend. After completion, the Report view confirms successful data transfer into the accredited Excel certificate and provides access to the temporary measurement file. The developed GUI structure is summarized in Figure 3.

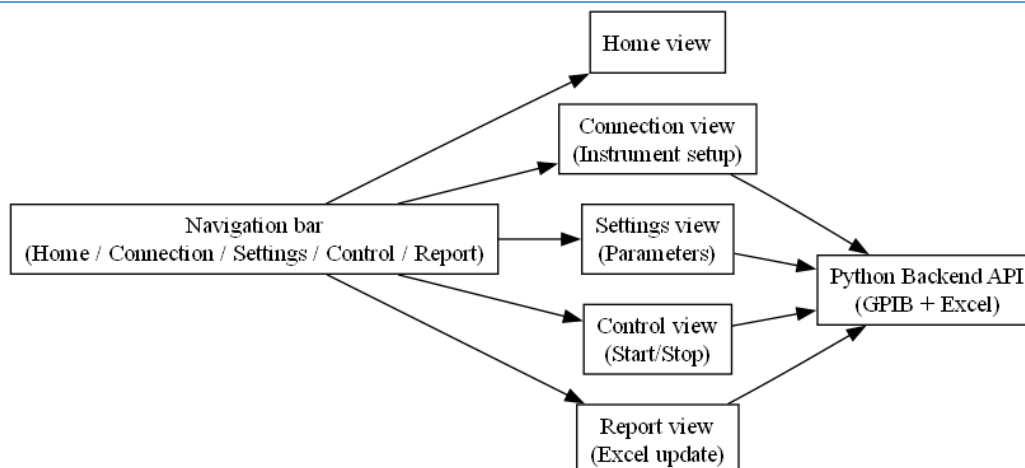


Figure 3 *User interface structure*

The interface visualizes system status and backend decisions but cannot modify computational cells, formulas or uncertainty evaluations in the certified report. As a result, the GUI supervises and documents calibration progress without influencing the metrological evaluation process.

4. Conclusions

This paper presented a semi-automated calibration system for industrial pressure transmitters, in which the execution of the accredited workflow is automated without altering any certified calculations. By controlling the reference instruments via GPIB and transferring measurement data directly into the validated Excel-based calibration report, the developed solution reduces operator intervention while fully preserving traceability and compliance with accredited laboratory requirements.

The implementation does not seek to eliminate human oversight or to replace the accredited evaluation framework. Instead, it minimizes the risk of transcription errors, enforces repeatable execution of the calibration steps, and ensures that stabilization, loading sequence, and edge-point handling are carried out consistently across operators and laboratories. As a result, the repeatability and auditability of the calibration process can be improved without modifying the underlying metrological definitions, formulas or uncertainty calculations.

The application is currently undergoing laboratory validation on multiple measurement stations, where user feedback is used to correct instrument-specific issues and refine workflow robustness. Early testing confirms that the system lowers the likelihood of operator-induced errors and supports more consistent calibration execution, providing a practical balance between automation and accredited metrological control.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”



This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Madhu, A.S. & Sethuram, D. & Vijayalakshmi, V. & Koppad, Praveennath. (2019). Automatic pressure calibration system for pressure sensors. FME Transactions. 47. 111-115. 10.5937/fmet1901111M.
- [2] Wüest, M. & Caduff, G. & Jaeger, E. & Riederer, N.. (2007). Calibration of pressure sensors in an industrial environment. Vacuum. 81. 1532-1537. 10.1016/j.vacuum.2007.04.014.
- [3] Chia-Chi, Chang & Chiu, Yen-Ting & Wei, Ching-Chuan. (2021). Design instrument control software interface based on SCPI commands to reduce development time. 97-100. 10.1109/ICASI52993.2021.9568467.
- [4] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf
- [5] H.M. Hashemian, Jin Jiang, Pressure transmitter accuracy, ISA Transactions, Volume 48, Issue 4, 2009, pp. 383-388, ISSN 0019-0578, 10.1016/j.isatra.2009.04.008.
- [6] FGSZ Zrt. HR és Társasági Szolgáltatások Kalibrálólaboratórium: Villamos kimenőjelű abszolút -, túlnyomás -, és nyomáskülönbség távadók kalibrálása

SEMI-AUTOMATED CALIBRATION OF RESISTANCE THERMOMETERS WITH REFERENCE-LEVEL MEASUREMENT

Zsófia Forgács

University of Miskolc, Institute of Automation and Infocommunication; zsofia.forgacs@uni-miskolc.hu

Abstract

Industrial temperature measurement systems widely rely on platinum resistance thermometers (RTDs), such as the standardized Pt100 sensors. These instruments require periodic calibration in accredited laboratories in order to maintain traceability and guarantee conformity with ISO/IEC and national metrology regulations. This work introduces a semi-automated calibration system that preserves accredited evaluation methods while reducing operator workload and eliminating transcription errors. The proposed solution automates set-point control of a dry-block metal thermostat, performs GPIB-based resistance measurement using a Keithley multimeter, supervises basic stability conditions, and logs data into a structured journal file. The validated Excel calibration record is filled using controlled data transfer without altering any metrological computations. The approach complies with the official laboratory procedure for Pt100 calibration and offers extensible architecture towards fully automated uncertainty evaluation while maintaining traceability to standard Pt100 models.

Keywords: instrument control, metrology, thermometer calibration, SCPI, Python

1. Introduction

Platinum resistance thermometers (RTDs) constitute one of the most accurate and repeatable industrial temperature sensors, widely applied in process control, energy infrastructure, and chemical manufacturing [1-3]. Their metrological performance depends on a stable and traceable relationship between electrical resistance and temperature, specified by the MSZ EN 60751:2009 standard. Accredited calibration laboratories rely on structured procedures to ensure traceable comparison against calibrated reference sensors placed in a controlled dry-block thermostat. The full laboratory workflow typically includes:

1. insertion of the sensor into a metal block thermostat,
2. stabilization at prescribed temperature set-points,
3. measurement of sensor resistance via a precision meter,
4. comparison against an accredited reference RTD,
5. uncertainty evaluation and conformity assessment [4].

However, manual execution introduces two major inefficiencies: extended stabilization waiting periods and manual data entry to Excel-based certificates, which can lead to transcription errors. In this paper, a semi-automated software system is presented, that maintains the accredited evaluation workflow without modifying any uncertainty or correction formulas and reduces human interaction through instrument-level control and structured report integration.

2. Materials and methods

The experimental work was performed in an accredited metrology laboratory to examine how selected stages of resistance thermometer calibration can be carried out in a semi-automated manner without altering the underlying certified evaluation process. This section provides an overview of the laboratory setup and instrumentation used during calibration, introduces the semi-automated workflow that replaces manual timing and instrument interaction, and describes the software architecture enabling modular control of the thermostatic source and precision multimeter.

2.1. Measurement Setup

The semi-automated calibration system is designed to follow the accredited resistance thermometer calibration procedure for Pt100 platinum resistance thermometers, according to MSZ EN 60751:2009 specifications. The workflow is based on a dry-block metal thermostat as the temperature source and a four-wire resistance reference measurement chain. The assembly consists of the components listed in Table 1.

Table 1 *Main components of the measurement setup*

Component	Description	Relevant Property
Dry-block thermostat	Stabilized heat source for the calibration points	DLC compensation, controlled slew
Reference Pt100 RTD	Traceable platinum sensor with certified calibration	Placed in adjacent bore
Device-Under-Test (DUT)	Resistance thermometer to be calibrated	4-wire measurement
Multimeter (GPIB)	High-accuracy resistance measurement	4-wire configuration
PC Software (Python)	Semi-automated control and reporting	Web GUI, structured logging

The DUT and reference sensors are inserted into calibrated bores of the metal block. Stability assurance is provided by the thermostat's reference measurement, supported by DLC functionality when available.

2.2. Semi-Automated Procedure

The software automates instrument control while preserving the accredited mathematical evaluation. No corrections, uncertainty models, or deviations are performed outside the validated documents. The semi-automated routine consists of:

1. Loading the official calibration Excel template and extracting set-point temperatures directly from defined table cells.
2. Setting the thermostat set-point with an automatically configured slew rate and measurement resolution.
3. Waiting until the PV or reference sensor enters a tolerance band around the target set-point (defined by user-configurable $\pm\Delta T$ tolerance and minimum time window).
4. Performing multimeter resistance acquisition, where the DUT resistance is sampled multiple times via GPIB and averaged for repeatability.
5. Logging reference and DUT values to a structured measurement log in .xlsx (RunLog) without modifying the accredited certificate.
6. Transferring summary data from the RunLog document into the official certificate manually.

This approach specifically reduces user workload while maintaining traceability of all computational steps. The Excel certificate remains the sole source of uncertainty evaluation and conformity assessment.

2.3. Software Architecture

The software stack is structured into device-level communication modules and a measurement controller. The main program units listed in Table 2.

Table 1 *Main components of the measurement software*

Module	Purpose
thermostat_comm.py	Serial communication, set-point configuration, PV access, DLC commands
multimeter_comm.py	GPIO instrumentation interface, 4-wire measurement, statistical sampling
meas_control.py	Set-point logic, stabilization logic, measurement sequencing
excel_handler.py	Safe template access and reading without altering calculations
run_log.py	Structured XLSX logging (Meta, Raw, Summary sheets)
main.py	GUI orchestration, thread management

All recorded values include timestamps, set-point assignments, measured resistance and reference readings, and resulting statistical values, allowing post-validation and traceability.

3. Results and discussion

The semi-automated calibration environment was implemented as a modular Python application capable of controlling both the thermostatic bath and the precision multimeter through independent instrument-level communication layers. Although the measurement automation is currently under development, the implemented modules already provide a robust proof-of-concept for fully traceable Pt100 temperature transmitter calibration.

3.1. Modular Instrument Control

The instrument layer of the developed software separates device communication from measurement logic, allowing thermostatic control and resistance acquisition to operate as independent modules. Each instrument is accessed through a dedicated driver that exposes high-level functions (such as applying a set-point or retrieving resistance data) while encapsulating low-level SCPI commands, interface selection, and communication stability handling. The concept of separating communication interfaces from measurement logic follows widely adopted practices in industrial control and instrumentation systems, where device interaction is standardized through configurable, interface-agnostic communication layers [5, 6].

In practice, this enables the Fluke 9171 dry-block and the connected precision multimeter to be controlled through the same application without assuming their communication capabilities in advance. When a multimeter model supports both RS-232 and GPIB, the driver selects the appropriate interface through configuration rather than code changes. Conversely, if only one protocol is available, the driver automatically restricts communication to the supported interface. In this way, measurement reproducibility does not depend on the operator's knowledge of device-specific settings, but on a uniform command layer that masks model-dependent differences.

This modularity serves as the foundation for the subsequent control logic: the measurement controller can adjust set-points, monitor stabilization, and trigger resistance sampling without directly interacting with communication details. As a result, the software remains extensible toward other temperature sources or multimeters, while the traceability requirements of accredited calibration are preserved through a consistent abstraction between instruments and metrological decision rules. Such separation also simplifies validation, since the correctness of communication can be verified independently from the metrological evaluation of the measured data. Consequently, later extensions to the system can focus on measurement strategy and uncertainty handling without requiring modifications to instrument control.

3.2. Serial Thermostat Driver and Stability Supervision

The development of the serial thermostat driver constitutes a primary outcome of the current research phase, as it enables semi-autonomous control over temperature conditioning during resistance calibration. In the present laboratory environment, the available temperature baths are accessible exclusively through RS-232 communication. This interface selection is therefore not a design preference but a constraint dictated by the instrument pool, particularly by Fluke thermostats that expose limited or partially documented remote command sets. As a consequence, the driver was designed to accommodate hybrid communication patterns rather than depend solely on SCPI compliance, which would be impractical for the equipment in use.

Through this approach, the software introduces an abstraction layer that encapsulates operational differences between manufacturer-specific commands and SCPI-style query mechanisms. As a result, the measurement controller can set the target temperature, retrieve the current process value, and monitor reference sensor readings without knowledge of the underlying command syntax. In addition, the driver is able to determine, autonomously, whether the thermal environment has reached a stable state that is acceptable for calibration. This is achieved through user-definable tolerances and temporal stability windows, which reflect the criteria prescribed by accredited laboratory procedures, but without binding the software implementation to one specific document or facility standard. The implemented functionality can be summarized in Table 2, highlighting the operational scope of the driver.

Table 2 *Implemented functions for accessing thermostat driver*

Function	Realization	Purpose
Communication port validation	<code>validate_port()</code>	Prevents misconfiguration and protects the instrument
Temperature unit and precision configuration	<code>configure()</code>	Ensures consistent temperature representation (°C)
Programmatic setpoint control	<code>set_setpoint_c()</code>	Establishes measurement conditions autonomously
Querying actual process value (PV)	<code>get_pv_c()</code>	Required for evaluating thermal stability
Reading reference sensor	<code>read_ref_temp_c()</code>	Supports procedures relying on external temperature reference
Automated stability wait	<code>wait_until_reached()</code> <code>wait_ref_until()</code>	Removes subjective operator judgement from stability assessment

The scientific relevance of this module lies not in presenting performance metrics at this stage (since systematic validation remains ongoing) but in replacing operator-dependent decision making with algorithmic supervision. During manual

measurement campaigns, the operator typically inspects the front-panel display and decides, often subjectively, when the system is sufficiently stable to proceed. In contrast, the developed driver evaluates the transient behavior continuously in the background and only reports readiness once the stability requirements have objectively been satisfied. Such reproducibility is crucial in metrological environments, where even small inconsistencies in temperature settling may bias resistance measurements and, consequently, influence estimated uncertainties.

Although uncertainty propagation is not yet automated in this research phase, the programmable thermal control layer established by the driver forms a prerequisite for future full automation. Once validated across different thermostatic systems and laboratory conditions, the same architecture can support extended calibration workflows or become part of autonomous uncertainty evaluation schemes. The current results therefore represent not merely a technical contribution, but a methodological foundation for reproducible and instrument-agnostic temperature control in resistance metrology.

3.3. GPIB Multimeter Driver and Resistance Sampling

A second key component of the backend architecture is the multimeter driver, which enables programmable resistance measurements in the semi-automated calibration workflow. In contrast to the temperature baths, where RS-232 is the only feasible communication interface, the precision multimeters used in this study support remote access through the IEEE-488 (GPIB) bus and, in certain instrument configurations, also through RS-232. Since the exact availability of serial control depends on the individual model and hardware configuration, the developed driver allows the communication interface to be selected when applicable, while the software remains agnostic to the underlying transport layer. In this design, the choice between GPIB and serial communication is thus not hard-coded but exposed as a configurable parameter that can be adapted to the laboratory instrument currently in use.

The driver abstracts the details of the communication protocol and provides a uniform measurement interface, enabling both direct single readings and statistically averaged resistance values. The latter is of particular relevance in resistance calibration, where sensor noise and short-term environmental fluctuations can bias instantaneous measurements. By repeatedly sampling the instrument output at consistent integration settings and computing a mean value, the software enforces a minimal level of traceable measurement conditioning, even though comprehensive uncertainty handling remains outside the present development scope. The implemented functions are summarized in Table 3.

Table 3 *Implemented functions for accessing the multimeter*

Function	Realisation	Purpose
Instrument connection and release	<code>connect()</code> , <code>disconnect()</code>	Ensures safe control session handling
Configuration of resistance mode	<code>set_func_resistance()</code>	Standardizes measurement setup across supported models
Single resistance acquisition	<code>meas_resistance_once()</code>	Provides immediate feedback and diagnostic readings
Averaged resistance sampling	<code>meas_resistance_series()</code>	Reduces noise effects and improves reproducibility

By replacing manual instrument handling and handwritten data recording with programmatic control and automated sampling, the driver turns resistance measurement into a repeatable digital process. Although extensive multi-instrument validation is still ongoing, the current implementation already provides a stable foundation for later stages of the work, where automated uncertainty calculation and device-to-device comparison will be addressed. For the present research

phase, the driver itself represents a meaningful technical outcome, as it enables traceable, software-controlled resistance measurements instead of subjective, operator-dependent interaction.

3.4. Measurement Controller and Thermal Stability Logic

The measurement controller governs the interaction between the temperature source and the precision multimeter, ensuring that resistance values are recorded only under thermally stable conditions. This design choice directly reflects accredited calibration practice, where temperature drift prior to measurement is not tolerated. As stated in the associated laboratory procedure [4], the operator must “wait for the stabilization of the values before recording them in the certificate, and the measurement shall not be performed if stabilization cannot be ensured”.

The software transforms this qualitative requirement into a quantitative and repeatable decision rule. A dedicated control layer (“*MeasControl*”) continuously monitors either the internal control signal (PV) or the reference probe, depending on configuration, and evaluates whether the measured temperature remains within a tolerance band (ΔT) surrounding the selected setpoint (SP) for a continuous time window (Δt). This logic is implemented as an explicit temporal condition, rather than a snapshot-based check, preventing premature acceptance caused by short-term fluctuations. The algorithmic enforcement can be seen in the controller settings used by the backend API, where ΔT , Δt and polling behavior are jointly updated and synced before launching a measurement sequence, and in the stability evaluation routine *wait_for_stability_vs_target()* that requires uninterrupted compliance with ΔT over a prescribed duration.

If stabilization does not occur within a configurable timeout, the measurement step is skipped, and this decision is documented automatically in the run log. The use of structured logging (“*RunLog*”) ensures traceable reporting of timestamps, actual reference temperatures, and measurement status codes without manual intervention. This provides a digital equivalent of the paper-based certification workflow, while reducing operator dependence and eliminating subjective judgement regarding “sufficient stabilization”.

As a result, thermal stabilization becomes a verifiable precondition for data acquisition rather than an informal technician decision. Although this work does not yet address full uncertainty propagation, the controller establishes a minimum level of traceability and reproducibility expected from accredited resistance thermometer calibration and forms the backbone for future extensions involving automated uncertainty analysis and comparative device studies.

4. Conclusions

The presented semi-automated calibration framework demonstrates that instrument-level control can be integrated into accredited laboratory workflows without altering certified evaluation rules. By automating set-point transitions, stability supervision and resistance sampling, the system reduces operator dependency while maintaining traceability through unmodified certificate processing. The implemented communication modules enable software-controlled calibration using heterogeneous thermostatic sources and precision multimeters, decoupling metrological decision logic from device-specific interfaces.

Although complete automation of uncertainty evaluation is outside the scope of the present research phase, the architecture establishes the prerequisite conditions for reproducible, device-agnostic calibration under accredited constraints. Future extensions may therefore focus on validated uncertainty handling and comparative studies across multiple instrument configurations, building on the reproducible control and measurement mechanisms introduced in this work.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Parali, Levent & Durmaz, Faruk & Aydın, Olcay. (2018). Calibration of a Platinum Resistance Thermometer (Pt-100) and Its Measurement Uncertainty Analysis. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi. 14. 41-49. 10.18466/cbayarfbe.334988.
- [2] Bojkovski, Jovan & Batagelj, Valentin & Drnovšek, Janko & Žužek, Vincencij. (2009). Practical limits of measurement uncertainties in calibration of standard platinum resistance thermometers by comparison. 19th IMEKO World Congress 2009. 4.
- [3] Yuting Zhang, Chengyu Fu, Fanchao Zeng, Yang Liu, Fu Bao, Weijun Huang, Jianhuan Li, Xingyun Li, Analysis of measurement comparison results and uncertainty of industrial platinum resistance thermometer, Measurement: Sensors, Volume 38, Supplement, 2025, 101632, ISSN 2665-9174, 10.1016/j.measen.2024.101632.
- [4] FGSZ Zrt. HR és Társasági Szolgáltatások Kalibrálólaboratórium: Kalibrálási eljárások – PT100 típusú ellenállás hőmérő érzékelők kalibrálása
- [5] Harald Schumny, Fieldbuses in measurement and control, Computer Standards & Interfaces, Volume 19, Issues 5–6, 1998, pp. 295-304, ISSN 0920-5489, 10.1016/S0920-5489(98)00029-4.
- [6] Roland Szabó, Aurel Gontean, Controlling Power Supplies on Different Communication Interfaces for Test Systems Used in Industry, IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 28, 2013, pp. 438-443, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902823533, 10.3182/20130925-3-CZ-3023.00022.

DEFINITION AND MODELING OF STABILITY IN CALIBRATABLE SENSORS

Marcell Jobbágy¹

¹* University of Miskolc; marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu

Abstract

Sensor stability is a critical performance attribute that affects the long-term accuracy and reliability of calibratable sensors. This paper investigates the definition of stability in metrological terms and its impact on sensor calibration strategies. A detailed overview of stability metrics, such as drift, noise characteristics, and sensitivity variation, is presented. Deterministic and stochastic modeling approaches are analyzed, including linear drift models and random walk processes. The findings emphasize the importance of accurate stability modeling in extending calibration intervals and ensuring traceable measurements over time.

Keywords: sensor stability, calibratable sensors, drift modeling, measurement traceability, sensor calibration, stochastic modeling

1. Introduction

Generally speaking, sensors have a pivotal role in automated systems. By transforming physical data, such as temperature, pressure, and gas concentration, into quantifiable electrical signals for digital use, one can seldom find a fully automated industrial plant without any sensors. Many applications require high precision and reliability, and high-quality sensors being on the pricey end of the scale, the long-term behavior of said sensor becomes just as important as its initial performance. A key characteristic to inspect when buying a sensor for a prolonged use is stability, typically defined as a sensor's ability to maintain its metrological properties over time under stated conditions.

Stability is particularly vital in calibratable sensors. These sensors are made to be periodically adjusted to match with the measurement standard. Despite being adjustable, they experience gradual changes in performance due to environmental effects, aging and internal component degradation. To minimize the uncertainty of our measurement system, and to ensure the sensors outputs are trustworthy, understanding the nature and magnitude of this natural degradation is crucial.

The field of metrology associates stability with systematic and random deviations, commonly called as drift, which can be quantified and modeled. Modeling stability enables the prediction of performance degradation, informing calibration schedules and supporting the development of automated diagnostic and maintenance protocols.

The purpose of this paper is to provide a comprehensive definition of sensor stability, explore the most commonly used metrics, and present modeling strategies suitable for capturing long-term sensor behavior. The results aim to support engineers and researchers in designing more reliable and self-aware sensor systems. This concept is defined in metrological standards such as the VIM [1]. Various studies describe how sensor aging and environment lead to drift over time [2].

2. Materials and Methods

The evaluation of stability in calibratable sensors requires a combination of theoretical modeling and data analysis. In this study, we consider both deterministic and stochastic approaches to characterize the long-term variation in sensor output. The models aim to capture the systematic drift as well as random fluctuations that occur during sensor operation.

2.1. Deterministic Stability Models

Deterministic models assume that the drift in sensor output follows a predictable, often monotonic trend. The most common forms include the linear drift model (Equation 1) and the exponential drift model (Equation 2) [3, 4].

$$y(t) = y_0 + \alpha t \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 \cdot e^{\beta t} \quad (2)$$

These models are appropriate for sensors operating in stable environments where external disturbances are minimal, or where degradation mechanisms are well-understood and linear over time.

2.2. Stochastic Stability Models

To capture the unpredictable, random fluctuations in sensor performance, stochastic models are used. These include the random walk model (Equation 3) and the auto-regressive model (Equation 4) [5, 6].

$$y(t + 1) = y(t) + \varepsilon_t \quad (3)$$

$$y(t) = \varphi y(t - 1) + \varepsilon_t \quad (4)$$

These models are suitable for describing real-world sensor data where environmental and operational conditions introduce unpredictable variations in sensor behavior over time.

2.3. Parameter Estimation

To apply the above models, historical sensor data is required for estimating the drift and noise parameters. In the absence of experimental data, synthetic datasets were generated using pre-defined parameters to evaluate model behavior. The least squares method was used for linear trend fitting, while parameters of stochastic models were estimated using the maximum likelihood estimation (MLE) technique. All computations and model simulations were conducted using MATLAB and Python-based data analysis tools.

3. Results and Discussion

To evaluate the applicability of the proposed models for characterizing sensor stability, a synthetic dataset was generated representing 100 days of sensor operation. The simulated sensor output includes a linear drift of 0.02 units per day, with added Gaussian noise to reflect measurement fluctuations (Figure 1).

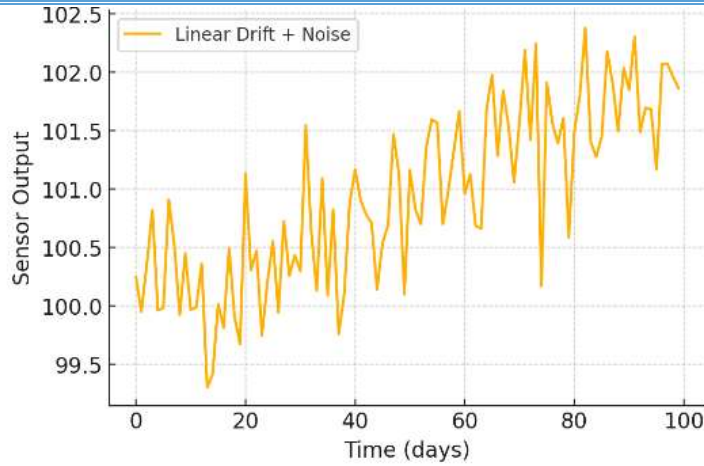


Figure 1 Simulated Sensor Stability (Linear Drift Model)

Figure 1 shows that the sensor output has a definite upward trend, which aligns with the linear drift model described in Equation 1. This behavior coincides with real-life sensor degradation cases, where gradual changes in sensitivity or offset occur alongside short-term noise. A linear regression was applied to estimate the drift component. The resulting slope closely wrapped the true drift rate used in the simulation ($\alpha \approx 0.02$), therefore validating the effectiveness of the deterministic model. The residuals were then analyzed and confirmed to follow a normal distribution with zero mean, supporting the use of Gaussian noise modeling.

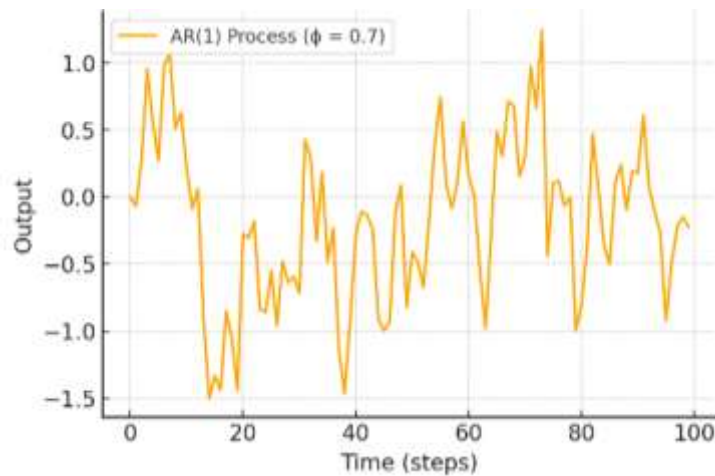


Figure 2 Simulated AR(1) Sensor Noise Model

For stochastic analysis, a first-order autoregressive model was fitted to the residuals as one can observe in Figure 2. The estimated autoregressive parameter ϕ was near zero, which suggests low persistence in the noise term. This is typical of white noise.

Accurate modeling of sensor stability enables more informed decisions regarding calibration intervals. In this case, the linear trend shows a predictable drift. This is easily correctable. However, left unchecked, the sensor output would deviate by 2 units over a 100-day period, which can be devastating depending on the sensor's application.

4. Conclusions

This study presented a detailed examination of stability in calibratable sensors, focusing on its definition, significance, and mathematical modeling. Stability was shown to be a critical factor in long-term sensor performance, particularly in determining appropriate calibration intervals and ensuring traceable measurement quality.

Deterministic models offer a straightforward way to capture systematic changes in sensor output. Stochastic models are the flip side of the same coin: they work with the unpredictable, noise-like variations. When used together, these models provide a robust framework for describing and forecasting sensor behavior over time.

The simulated dataset and model fitting results illustrated how stability modeling can be used to identify and quantify drift and uncertainty. Such modeling not only supports calibration planning but also forms the basis for predictive maintenance and the design of self-correcting sensor systems.

In conclusion, using both deterministic and stochastic modeling techniques is heavily advisable for achieving high reliability and accuracy in sensor-based systems. Future work may include applying these methods to experimental data and integrating machine learning approaches for real-time drift detection and correction.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 'International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM),' 3rd edition, JCGM 200:2012.
- [2] Apogee Instruments, 'Understanding Sensor Accuracy and Stability,' Technical Note, 2023. Available: <https://www.apogeeinstruments.com/understanding-sensor-accuracy-and-stability/>
- [3] R. Tiberti, M. Bartoli, D. Bertoni, et al., 'Automated high frequency monitoring of Lake Maggiore: The real functioning of multiparameter probes and correction of sensor drift using linear regression,' Sci. Total Environ., vol. 781, 2021, 146737.
- [4] NASA, 'Navigation Filter Best Practices,' NASA Technical Reports Server (NTRS), including exponential bias model $b(t+\Delta t) = e^{(-\Delta t/\tau)} \cdot b(t) + \omega(t)$, 2025.
- [5] Wikipedia, 'Autoregressive model,' accessed Jun. 2025.
- [6] Applied Time Series Analysis labs, 'Properties of AR(1) Model,' Apr. 2021.

The Validation of Calibration Models – International Approach

Marcell Jobbágy¹

¹* University of Miskolc; marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu

Abstract

This paper discusses widely accepted techniques for checking the accuracy of math-based calibration models. It focuses on three main methods: comparing results with known standards, checking performance at multiple points, and analyzing confidence levels. The paper looks at each method from the basics of the theory behind them, how they are actually used in practice, and the support they have from regulations. Special attention is given to how these methods apply to systems that measure hydrogen. This is important because hydrogen has unique properties like high spreadability, chemical reactivity, and varying behavior under different conditions, making traceability and managing uncertainty very important. The paper also talks about the advantages and drawbacks of these methods and how international standards help ensure that calibration models are reliable and effective for new hydrogen technologies.

Keywords: *Reference standards, Measurement uncertainty analysis, Calibration model validation*

1. Introduction

The accuracy and trustability of any measurement system depends a lot on the calibration model used. These calibration models are mathematical tools that help convert a sensor's raw output into usable, actual measurements. Creating one such model, however, isn't enough. There have to be controlling and checking methods implemented to ensure consistency, functionality and accuracy in the real world.

Nowadays these are quintessential when it comes to measuring hydrogen, as it is becoming ever more important both as an energy source and as an industrial material. It needs to be handled safely and efficiently, which is difficult because of its characteristics, such as being very light, reactive and is capable of working in a wide range of pressures. Mistakes in measuring hydrogen can harm safety systems, affect delivery and in worse cases, cause explosions.

To meet these challenges, international standardization bodies such as ISO, OIML, and EURAMET have emphasized the importance of calibration model validation. This paper investigates three key methods used in international practice to validate mathematical calibration models: reference comparison, multi-point verification, and confidence analysis. Each method provides a distinct lens on calibration performance and is often used in combination to achieve metrological confidence. Their relevance to hydrogen systems is analyzed in the context of flow metering, concentration analysis, and quality control systems.

2. Validation Methods Overview

Three distinct but complementary methods are widely used to validate mathematical calibration models: reference comparison, multi-point verification, and confidence analysis. Each method offers a different perspective on model accuracy, robustness, and suitability for use across diverse operating conditions.

2.1. Reference Comparison

Reference comparison is the method in which we compare the output of a calibration model against a known, traceable standard. This approach is the foundation of traceability and repeatability in metrology as it allows laboratories and industrial operators to demonstrate that their custom models perform within internationally accepted values. One such standard is the ISO/IEC 17025, requiring reference-based comparisons as part of its accreditation process. [1].

In hydrogen metrology, reference comparison is typically performed by measuring hydrogen flow or concentration using a primary standard (e.g., a gravimetric or volumetric standard) and comparing it with the result of the device under test. For example, a hydrogen mass flow controller may be calibrated against a piston prover, with the model error evaluated at various flow rates. Deviations outside the uncertainty limits indicate model inadequacy. This approach was demonstrated in the work of Tanaka et al., where industrial hydrogen flow meters were validated using gravimetric reference systems [2].

This method's strength is its simplicity and credibility. This is, however, dependent on the availability of standards and even then, these standards may not capture all operational scenarios. In some cases, constructing a hydrogen-compatible reference system is technically challenging due to material compatibility or gas purity requirements.

2.2. Multi-point Verification

Multi-point verification, or MPV for short, test the performance of a calibration model across several pre-determined input values. This is very useful for identifying non-linearity problems or boundary conditions where the accuracy degrades. It works by applying known test points, such as pressure, concentration or flow rate, and comparing the measured output to the model's prediction. In hydrogen-included systems, MPV involves testing the sensors at multiple temperatures, gas mixtures or pressure levels. These test help determine whether a single model is enough across the range or multiple are needed.

This verification method offers a deeper understanding of limitations of the model. It also supports the development of adaptive models that improve performance in worse-than-ideal conditions. On the flip side, however, it is time-consuming and expensive, especially when there are lots of environmental factors to be controlled during testing.

2.3. Confidence Analysis

Confidence analysis quantifies the uncertainty associated with the calibration model. It involves statistical tools such as residual analysis, uncertainty propagation, and Monte Carlo simulation to estimate how likely a model's prediction is to be correct. Monte Carlo methods are often used when models are too complex for analytical solutions. A distribution of model predictions is generated by simulating thousands of input sets with randomly drawn uncertainties. The output distribution reveals the likely range of the true value. This method is especially helpful when dealing with correlated inputs or non-Gaussian errors [3].

According to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), all components contributing to measurement uncertainty should be identified, quantified, and combined. This allows users to associate a confidence interval with every measurement. In the context of hydrogen systems, confidence analysis is critical for applications where safety margins or regulatory limits must be enforced. For example, measuring hydrogen concentration in a flammable atmosphere may require very high confidence in accuracy [4, 5].

3. Case Application

Hydrogen Measurement Systems In the United States, the National Renewable Energy Laboratory (NREL) has established a hydrogen sensor validation facility to support these efforts [6].

Hydrogen measurement systems have unique validation challenges due to the gas's characteristics. Sensors must be validated under a very broad range of environmental conditions to ensure accuracy. Common applications include but not limited to hydrogen fueling stations, electrolyzers, process monitoring and natural gas mixtures. For instance, thermal mass flow controllers in hydrogen stations must maintain accuracy in flow rates ranging from 0.1 to 1000 slpm and in pressure levels up to 700 bar. To validate the controller's model reference comparison is used against a gravimetric standard, along with multi-point flow verification, then a residual-based confidence analysis is completed. Gas chromatographs must also be verified using certified reference materials for hydrogen purity monitoring. Hydrogen's molecular size, being the smallest in the periodic table, leads to challenges in ensuring system integrity, especially so at low concentrations. Models must, therefore, consider gas permeation and leakage, which may and will introduce long-term drift. Validation therefore include repeatability testing over time.

The growing adoption of hydrogen blends in natural gas pipelines also necessitates robust models capable of distinguishing hydrogen content under varying compositions. Here, multi-point verification and uncertainty estimation are essential to ensure that sensors do not misidentify blends or produce biased results.

4. Discussion

Each of the validation methods discussed provides complementary insights into calibration model quality. Reference comparison ensures metrological traceability. Multi-point verification ensures that the model behaves accurately across operational conditions. Confidence analysis provides a quantified view of the uncertainty in predictions. These validation tools are meant to be used on their own, and they work just fine as such. However, in reality, they should be used in conjunction to create a very robust validation framework.

From an international perspective, harmonizing validation practices is quintessential for mutual recognition of measurements. Laboratories accredited under ISO/IEC 17025 must document their used validation strategies and associated uncertainties. EURAMET and other regulatory bodies have and are publishing guidance documents to standardize flow and gas metrology, but hydrogen being new in this scale, hydrogen-specific calibration procedures are still in an evolutionary state. Challenges specifically in hydrogen fueling infrastructures have been explored by Shimizu et al., which include but are not limited to transient flow behavior and material compatibility [1, 5].

With widespread digitization, there is an increasing use of digital calibration certificates, which offer opportunities to embed validation metadata directly into the digital records. These are very promising for remote audits, inter-laboratory comparisons and even automated recalibration systems.

Cost and time remain limiting factors, particularly for small labs or pilot hydrogen applications. Thus, a risk-based approach is often used, where high-criticality systems (e.g., safety valves, purity monitors) receive full validation, while routine sensors may undergo simplified testing.

5. Conclusions

This article reviewed three internationally accepted methods for validating calibration models—reference comparison, multi-point verification, and confidence analysis—and examined their application to hydrogen measurement systems.

Hydrogen's unique metrological challenges require tailored validation strategies that incorporate traceable standards, wide-range operational testing, and robust uncertainty analysis.

The integration of these various validation tools provides confidence in model performance across vast applications. As hydrogen technologies evolve and expand further, international standardization and validation practices will play a pivotal role in ensuring accuracy, comparability and reliability.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. "The project was implemented with the support of the Ministry of Energy."

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] ISO/IEC 17025:2017, 'General requirements for the competence of testing and calibration laboratories,' ISO, 2017.
- [2] H. Tanaka et al., 'Calibration and Validation of Hydrogen Flow Meters in Industrial Applications,' Int. J. Hydrogen Energy, vol. 46, no. 12, pp. 8987–8995, 2021.
- [3] S. Eckert, R. Dykstra, and M. Klatt, 'Improving Flow Meter Calibration with Digital Calibration Certificates (DCCs),' Proc. of IMEKO World Congress, 2022.
- [3] K. Verma, L. Patel, and R. Singh, 'Uncertainty Analysis in Gas Sensor Calibration Using Monte Carlo Methods,' Sensors, vol. 21, no. 2, pp. 455–467, 2021.
- [4] JCGM 100:2008, 'Evaluation of measurement data — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM),' Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [5] M. Shimizu et al., 'Measurement Challenges in Hydrogen Fueling Infrastructure: Flow and Quality Assurance,' Metrologia, vol. 59, no. 4, 2022.
- [6] NREL, 'Hydrogen Sensor Validation Facility Overview,' U.S. National Renewable Energy Laboratory, 2020.

Hydrogen–Material Interactions and Their Impact on Pressure Sensors: A Review

Dávid Matusz-Kalász

¹*Institute of Physics and Electrical Engineering, University of Miskolc; david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu

Abstract

Hydrogen is playing an increasingly important role in energy and industrial technologies, yet its interactions with various materials can adversely affect the reliability and longevity of sensor devices—especially pressure transducers. This paper provides an overview of the typical hydrogen–material interactions, with particular emphasis on diffusion, absorption, and hydrogen embrittlement in metals. The effects of these mechanisms on the performance, sensitivity, and long-term stability of pressure sensors are discussed. By presenting both literature-based insights and practical examples, this review aims to support the selection of suitable materials and sensor types for use in hydrogen-rich environments.

Keywords: hydrogen interaction, permeation, creep, decompression cracking

1. Introduction

Hydrogen, as both an energy carrier and a technological gas, has received increasing attention in recent years due to the global shift toward cleaner energy sources. However, its unique physical and chemical properties pose a number of challenges in industrial applications, particularly in the field of sensing technology. Pressure transducers—often in direct contact with hydrogen gas—are especially sensitive to material choice, as hydrogen can penetrate structural materials and alter their mechanical, electrical, and chemical characteristics.

Hydrogen–material interactions such as diffusion, absorption, desorption, and embrittlement may not only shorten the lifespan of these devices but can also cause measurement errors, calibration drift, or even failure. This study aims to provide an overview of these interactions and their impact on pressure sensing devices, highlighting both international findings and experimental data. The paper also addresses the topic from a practical perspective, drawing on laboratory experience and specific application examples [1-4].

2. Overview of Hydrogen–Material Interactions

2.1. Behavior of Hydrogen in Different Materials

Hydrogen molecules (H_2) are exceptionally small and possess a high diffusion capability, which enables them to rapidly and deeply penetrate a wide range of materials. In metals, hydrogen typically diffuses in atomic form after dissociation, whereas in polymers and ceramics, molecular hydrogen is more dominant. The solubility and diffusion rate of hydrogen are highly dependent on the material's crystal structure, impurity content, as well as environmental conditions such as temperature and pressure [1-4].

2.2. Typical Interaction Mechanisms

The most relevant hydrogen–material interaction mechanisms include:

- Physical adsorption and absorption: Hydrogen is first adsorbed onto the surface and then dissociates into atoms, allowing it to diffuse into the bulk material.
- Diffusion: The migration of atomic hydrogen within solids, governed by activation energy and thermal conditions.
- Desorption: The release of hydrogen from the material, often triggered by temperature changes.
- Hydrogen embrittlement: A reduction in ductility caused by hydrogen, which may result in crack initiation or brittle fracture.
- Compound formation: Certain materials (e.g., palladium, titanium) form metal hydrides that significantly alter the material's physical properties.

2.3. Relevant Material Classes

With respect to hydrogen sensitivity and long-term stability, the following material groups are of particular importance:

- Metals and alloys: Stainless steels, copper, aluminum, and nickel-based alloys are commonly used in sensor construction but show varying susceptibility to embrittlement and hydrogen diffusion.
- Ceramics: Generally more resistant to hydrogen effects, though their mechanical strength can be a limiting factor.
- Polymers: Widely used for sealing applications, especially at low temperatures, but may suffer from hydrogen permeation and material aging.

3. Impact on Pressure Sensing Devices

3.1. Types of Pressure Sensors and Operating Principles

Pressure sensors operate based on a variety of physical principles, with the most common types being piezoresistive, capacitive, inductive, and optical sensors. Despite their differences, these devices typically rely on a deformable membrane or sensitive layer that responds to external pressure, translating mechanical deformation into an electrical signal [1-5].

The critical area in such sensors is the membrane and its immediate environment, as these parts are often in direct contact with the target gas—hydrogen, in this context.

3.2. The Role of Material Selection in Sensors

The performance and service life of pressure sensors are strongly influenced by how resistant the construction materials are to hydrogen exposure. Inappropriate material choices can lead to the following issues:

- Embrittlement and microcracks in the membrane

- Altered electrical properties of active layers (e.g., piezoresistive films)
- Calibration drift caused by hydrogen diffusion
- Premature aging of seals and insulating components

To avoid these problems, materials must be chosen that can withstand prolonged hydrogen exposure without significant degradation of their mechanical, chemical, or electrical properties.

3.3. Hydrogen-Related Challenges

When pressure sensors are used in hydrogen environments, the following challenges are commonly observed:

- Calibration drift: Hydrogen entering the material can modify the stress–strain response and thus affect the signal output.
- Sensitivity degradation: Long-term exposure may change the sensor’s response function.
- Corrosion and embrittlement: Especially under high temperatures or in humid environments, these effects can intensify material damage.
- Failure of insulating components: Hydrogen permeation in polymer-based materials can lead to leakage or dielectric breakdown.

For applications requiring high reliability, such as hydrogen fueling stations or energy system designers must carefully account for these factors in both material selection and sensor architecture. Table 1 summarizes the behavior of some materials in hydrogen environments.

Tables 1 *Overview of Material Behavior in Hydrogen Environments*

Material	Hydrogen Diffusivity	Embrittlement Tendency	Notes
Stainless steel	Moderate	Moderate	Widely used, but not fully resistant to embrittlement
Aluminum	Low	Low	Good corrosion resistance
Copper	Very low	Negligible	Excellent electrical conductor
Nickel alloys	High	High	Mechanically strong, but vulnerable to hydrogen
Ceramics	Very low	None	Inert, but mechanically fragile
PTFE, PEEK, EPDM	High permeation	None	Common sealing materials

4. Interactions with Metallic and Polymeric Seals

In hydrogen-based systems, the selection and performance of sealing materials are critical to ensuring safety, reliability, and operational integrity. Hydrogen interacts differently with metallic and polymeric seals, depending on material structure, pressure, and temperature conditions. These interactions impact permeability, mechanical durability, and failure modes. Understanding hydrogen’s interaction with sealing materials is vital for maintaining the integrity of hydrogen systems. Henry’s law solubility, permeation behavior, and time-dependent mechanical degradation (creep and stress relaxation) all influence seal performance. Material selection should be guided by resistance to long-term hydrogen

exposure, low permeability, and robustness against rapid decompression. Incorporating these considerations into design and maintenance strategies is essential for safe and reliable hydrogen infrastructure.

4.1. Henry's Law and Hydrogen Solubility

Hydrogen solubility in solid materials generally follows Henry's law, which states that at constant temperature, the amount of gas dissolved in a solid is proportional to the applied pressure. Due to its small molecular size, hydrogen readily dissolves into certain metals (e.g., palladium, nickel) and elastomers (e.g., EPDM, FKM). The value of the Henry's constant varies with material type, temperature, and molecular polarity. High solubility combined with diffusion leads to significant hydrogen uptake, especially at elevated pressures [6].

4.2. Permeation and Gas Transmission

Permeation involves three steps: adsorption at the surface, diffusion through the bulk material, and desorption at the opposite surface. Polymeric seals are particularly vulnerable to hydrogen permeation due to the high mobility of hydrogen molecules. The permeation rate depends on the material type (e.g., PTFE < EPDM < NBR), temperature, and pressure gradient. Metallic seals (e.g., spiral wound or lens gaskets) generally offer lower permeability but may become embrittled over time at high pressures or elevated temperatures [7-11].

4.3. Creep and Stress Relaxation

Creep, the time-dependent deformation of materials—is a concern for elastomeric seals under long-term exposure to pressure and heat. Over time, creep can reduce sealing force, leading to microleakage and increased hydrogen ingress. In dynamic sealing environments (e.g., valves or flanges), stress relaxation can be accelerated. Though less common in metals, thermal creep and mechanical fatigue may also occur in high-temperature hydrogen service, especially in thin metal sealing elements [6, 10, 12].

4.4. Decompression Cracking (RGA – Rapid Gas Decompression)

Rapid decompression cracking is a failure mode primarily affecting elastomeric seals. Under high pressure, hydrogen can penetrate into microvoids within the polymer structure. When pressure is released too quickly, trapped hydrogen expands internally, causing blistering, fissures, or even catastrophic rupture. This phenomenon is tested using standards such as NORSOK M-710. Materials like HNBR and FFKM generally exhibit good resistance, while silicone and EPDM are more susceptible to damage under RGD conditions [13].

5. Case Studies and Practical Experiences

5.1. Literature Examples and Test Results

As hydrogen technologies become increasingly widespread, the demand for quantitative assessments of system reliability and safety is growing. Reliability in this context is not merely a technical feature but a probabilistic concept that describes the likelihood of a device operating without failure under specified conditions over a defined time period. This consideration is particularly critical for high-pressure storage vessels, cryogenic systems, and mobile refueling units, where hydrogen leaks or explosions could have severe consequences.

Gusev et al. [14] provide a detailed analysis of mechanical and chemical stressors in cryogenic hydrogen systems, especially those affecting tanks and pipelines. Their study emphasizes hydrogen embrittlement and thermal fatigue due to

cyclic cooling and heating. Importantly, they advocate for probabilistic and statistical approaches to reliability estimation and present a range of formulas for predicting lifetime and failure rates.

In parallel, Mair et al. [15] focus on the safety of hydrogen transport using high-pressure composite cylinders, particularly in vehicular and infrastructure applications. Their novel approach defines safety in probabilistic terms and introduces the pressure-volume product ($p \cdot V$) as a critical parameter for quantifying the risk of severe consequences. They argue that regulatory frameworks should be reevaluated to consider worst-case scenarios and the probability of catastrophic failure.

The third study [16] also explores composite pressure vessels in transport applications and underlines the importance of understanding material-specific behavior through batch testing. The authors propose that future regulatory efforts should focus on target-based criteria, such as acceptable annual failure rates, rather than relying solely on fixed physical design parameters.

5.2. Calibration Challenges in Hydrogen Environments

Calibrating pressure sensors in hydrogen-rich environments poses several practical challenges:

- Sensor response may shift over time due to hydrogen ingress and internal stress;
- Calibrations performed in inert gases (e.g., nitrogen or air) may not accurately reflect behavior in hydrogen;
- Some devices require post-exposure regeneration or reconditioning to restore baseline accuracy.

Therefore, it is highly recommended to monitor calibration uncertainty continuously, especially in applications where the sensor is exposed to dynamically changing hydrogen conditions. Managing both the error margin and recalibration frequency is crucial for maintaining reliable long-term measurements.

6. Conclusions and Future Directions

The growing adoption of hydrogen-based technologies presents increasing challenges for the design and application of pressure sensing devices. This study has reviewed the key interaction mechanisms between hydrogen and various materials, and has highlighted how these interactions can significantly influence sensor performance and long-term reliability.

Based on the reviewed literature and laboratory measurements, the following conclusions can be drawn:

- Material selection plays a critical role in ensuring stable and accurate performance over time;
- Hydrogen diffusion and embrittlement can cause measurement drift even at relatively low pressures;
- Revised calibration strategies are necessary when deploying sensors in hydrogen-rich environments.

Looking ahead, several promising directions for further development include:

- The use of novel materials and coatings to minimize hydrogen permeation (e.g., metallic glasses, ceramic-based composites);

- Development of micro-scale sensor technologies, which may exhibit greater mechanical resilience due to their lower mass and smaller surface areas;
- Integration of intelligent sensor systems, capable of self-monitoring, drift compensation, or internal calibration (e.g., self-diagnostic or redundant architectures).

As hydrogen technologies continue to advance, sensing systems must evolve in parallel—especially in industries where accurate and reliable pressure measurement is essential for safety, control, and operational efficiency.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Massone, A.; Kiener, D. (2022). Prospects of enhancing the understanding of material-hydrogen interaction by novel in-situ and in-operando methods. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(17), 10097-10111. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.089>
- [2] Ahad, M. T., Bhuiyan, M. M. H., Sakib, A. N., Becerril Corral, A., & Siddique, Z. (2023). An Overview of Challenges for the Future of Hydrogen. *Materials*, 16(20), 6680. <https://doi.org/10.3390/ma16206680>
- [3] Collina, G.; Bucelli, M.; Paltrinieri, N. (2025). Multi-stage monitoring of hydrogen systems for improved maintenance approaches: an extensive review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 105, 458-480. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.112>
- [4] Ilnicka, A., & Lukaszewicz, J. P. (2020). Graphene-Based Hydrogen Gas Sensors: A Review. *Processes*, 8(5), 633. <https://doi.org/10.3390/pr8050633>
- [5] ISO 19880-3:2018. (2018). Gaseous hydrogen — Fueling stations — Part 3: Valves. International Organization for Standardization.
- [6] Chen, Y.-S.; Huang, C.; Liu, P.-Y.; Yen, H.-W.; Niu, R.; Burr, P.; Moore, K.L.; Martínez-Pañeda, E.; Atrens, A.; Cairney J.M. (2025). Hydrogen Trapping and Embrittlement in Metals -- A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 136, 789-821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.076>
- [7] Zhao, J.; Ding, G.; Feng, P.; Wu, C. (2025). High-pressure hydrogen effects on thermoplastics: A comprehensive review of permeation, decompression failure, and mechanical properties. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2025.05.001>
- [8] Jin, Z.; Su, Y.; Lv, H.; Liu, M.; Li, W.; Zhang, C. (2023). Review of Decompression Damage of the Polymer Liner of the Type IV Hydrogen Storage Tank. *Polymers (Basel)*, 15(10), 2258. <https://doi.org/10.3390/polym15102258>
- [9] Sgambitterra, E., & Pagnotta, L. (2024). Permeability: The Driving Force That Influences the Mechanical Behavior of Polymers Used for Hydrogen Storage and Delivery. *Energies*, 17(9), 2216. <https://doi.org/10.3390/en17092216>
- [10] Zheng, Y.; Tan, Y.; Zhou, C.; Chen, G.; Li, J.; Liu, Y.; Liao, B.; Zhang G. (2020). A review on effect of hydrogen on rubber seals used in the high-pressure hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(43), 23721-23738. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.069>
- [11] Bohlul, S., Alimardani, M. (2024). Revisiting the mechanism of rapid gas decompression failure in silica-reinforced NBR composites: Effect of interfacial phenomena. *Composites Communications*, 50, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.102009>

- [12] Habib, A. K. M. A., Sakib, A. N., Mona, Z. T., Bhuiyan, M. M. H., Kazempoor, P., & Siddique, Z. (2023). Hydrogen-Assisted Aging Applied to Storage and Sealing Materials: A Comprehensive Review. *Materials*, 16(20), 6689. <https://doi.org/10.3390/ma16206689>
- [13] Schrittester, B.; Pinter, G.; Schwarz, Th.; Kadar, Z.; Nagy T. (2016). Rapid Gas Decompression Performance of elastomers – A study of influencing testing parameters. *Procedia Structural Integrity*, 2, 1746-1754. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.220>
- [14] Gusev, A.L.; Gafarov, A.M.; Suleymanov, P.H.; Habibov, I.A.; Malikov, R.Kh.; Hasanov, Y.H.; Levina, A.I.; Mikheev, P.; Ufa R.A. (2024). Some aspects of reliability prediction of chemical industry and hydrogen energy facilities (vessels, machinery and equipment) operated in emergency situations and extreme conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 86, 482-510. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.462>
- [15] Mair, G.W.; Thomas, S.; Schallau, B.; Wang, B. (2021). Safety criteria for the transport of hydrogen in permanently mounted composite pressure vessels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(23), 12577-12593. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.268>
- [16] Xie, Z., Jin, Q., Su, G., & Lu, W. (2024). A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges. *Energies*, 17(16), 4070. <https://doi.org/10.3390/en17164070>

Theoretical Interpretation of Repeatability Characteristics in the Context of Long-Term Testing

Dávid Matusz-Kalász

1* Institute of Physics and Electrical Engineering, University of Miskolc; david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu

Abstract

Repeatability is a fundamental indicator of measurement reliability, with particular importance in laboratory-based long-term testing. This paper aims to provide a metrological interpretation of repeatability and to analyze how time-dependent influences—primarily drift—affect the practical validity of this characteristic. Special attention is given to drift phenomena observed in hydrogen-related measurements, where diffusion-driven signal deviations pose significant challenges to stability and reproducibility. The study outlines both theoretical and practical aspects of evaluating repeatability over extended periods and proposes potential strategies for interpretation and compensation in precision laboratory environments.

Keywords: keyword 1, keyword 2, keyword 3 (5–6 keywords should also be supplied)

1. Introduction

In long-term laboratory measurements, repeatability serves as a fundamental indicator of measurement system reliability and precision. While traditionally defined as the variability of results under unchanged conditions within short time intervals, real-world testing environments—especially those involving gases such as hydrogen—introduce time-dependent effects, most notably drift, which can significantly distort measurement outcomes [1]. Hydrogen's diffusion and permeation characteristics make it particularly impactful on the stability of metrological systems, as prolonged exposure can lead to gradual signal changes due to gas transmission through seals, sensor housings, or connecting materials [2, 3]. These phenomena often manifest as baseline shifts or non-linearity, ultimately distorting the statistical interpretation of repeatability and increasing long-term calibration uncertainty [4]. This study aims to revisit the theoretical interpretation of repeatability in measurement scenarios where drift is non-negligible, with special emphasis on distortions caused by hydrogen-related effects.

2. Theoretical Interpretation of Repeatability

Repeatability is a foundational concept in measurement science, describing the short-term stability and internal consistency of a measurement system. According to the International Vocabulary of Metrology (VIM, 3rd edition), repeatability is defined as “the closeness of the agreement between indications or measured quantity values obtained by replicate measurements on the same or similar objects under the same specified conditions” [5].

In essence, repeatability quantifies intra-system variability, and it can be described using several statistical indicators:

- Repeatability standard deviation (s_r): the standard deviation of repeated measurements under identical conditions;
- Coefficient of variation (CV%): the ratio of the standard deviation to the mean, expressed as a percentage;
- Within-range fluctuation: such as deviations near the zero point or a fixed reference value.

It is important to distinguish between repeatability and reproducibility. The former refers to variability under strictly controlled, same-condition measurements (e.g., same operator, instrument, location, and short time frame), while the latter considers broader variations (e.g., different operators, instruments, laboratories). A third, closely related concept is reproducibility in the inter-laboratory context, which assesses agreement across independent systems and conditions.

Repeatability is influenced not only by the technical specifications of the instrument—such as resolution or noise level—but also by external environmental factors, including temperature, humidity, and the surrounding gas composition. The latter is especially critical in hydrogen-based measurements, where diffusion and permeation can cause gradual signal shifts even within minutes of continuous exposure [2, 3].

It is not uncommon for a measurement system to demonstrate excellent short-term repeatability, while long-term time-dependent effects—such as drift—compromise the consistency of the overall dataset. In such cases, there is a clear need to reinterpret repeatability as a time-dependent property, moving beyond classical VIM definitions and adopting more advanced statistical models, such as exponentially weighted moving averages (EWMA) or regression-based approaches [1].

3. Repeatability in the Context of Long-Term Testing

While repeatability is conventionally assessed under conditions that minimize external variability, long-term testing inherently introduces factors that may compromise the stability of measurement results. Such conditions include temporal effects (e.g., drift), material aging, environmental fluctuations, and system-level instabilities that evolve over hours, days, or even weeks. These influences may not significantly affect individual short-term measurements but can substantially alter the broader statistical characteristics of a data series collected over time.

One of the primary challenges in this context is the presence of systematic temporal drift, defined as the slow, unidirectional change in the output of a measurement system unrelated to the actual quantity being measured. Drift can arise from a variety of physical phenomena, including thermal expansion, dielectric relaxation, sensor fatigue, and—particularly in gas measurement systems—permeation or adsorption effects [6, 7].

In the presence of such drift, traditional repeatability metrics—such as standard deviation or coefficient of variation—may underestimate the true uncertainty of a measurement process. For example, if a sensor slowly shifts its baseline due to gas diffusion into internal components, repeated measurements within short intervals may appear highly consistent, while long-term consistency degrades due to accumulating deviations. This disconnect leads to a critical distinction between short-term repeatability and long-term stability, both of which must be considered when evaluating the reliability of a measurement system.

To better represent measurement performance in long-duration tests, several approaches have been proposed:

- Time-series decomposition techniques can isolate trend (drift), seasonal, and residual (random) components of the signal [1].
- Regression analysis may be used to model deterministic drift and extract corrected values for repeatability estimation.
- Exponentially weighted moving average (EWMA) and CUSUM methods provide adaptive monitoring frameworks that are sensitive to slow parameter changes.

Importantly, the interpretation of repeatability in long-term contexts should account for whether drift is considered part of the system's uncertainty budget or a correctable artifact. In metrological traceability frameworks, uncorrected drift is typically included in the Type B uncertainty contribution; however, if drift is monitored and compensated, its impact may be significantly reduced [8].

Furthermore, it must be emphasized that drift is not solely a metrological nuisance—it can also be a diagnostic indicator of system degradation or interaction with the measurement environment. In the case of hydrogen exposure, for instance, drift may signal ongoing diffusion through polymer seals or irreversible adsorption within sensor substrates—phenomena discussed in detail in the next chapter [2, 3].

4. The Impact of Hydrogen-Induced Drift on Repeatability

Hydrogen is a unique and challenging element in the context of precision measurement. Due to its low molecular weight and high diffusivity, hydrogen readily permeates through many materials—including metals, polymers, and elastomers—posing significant risks to the long-term stability of measurement systems. In gas-based laboratories or test environments where hydrogen is present, either as a target analyte or as a background gas, hydrogen-induced drift is a well-documented phenomenon that directly affects repeatability.

4.1. Mechanisms of Hydrogen-Induced Drift

Hydrogen drift typically manifests as a slow, monotonic change in sensor output, often unrelated to actual changes in the measurand. This behavior can be traced to multiple physical mechanisms:

- Diffusion through seals and enclosures: Polymers such as NBR, EPDM, and FKM are widely used in sealing elements, yet they exhibit measurable hydrogen permeability. Over time, hydrogen permeates these materials and reaches internal sensor cavities, leading to gradual offset shifts or baseline drift [2].
- Adsorption and trapping: In certain materials, especially metals and porous ceramics, hydrogen atoms can be temporarily trapped or absorbed, slowly re-emitting over time, which introduces memory effects and hysteresis in the signal [3].
- Electrochemical or material degradation: Hydrogen exposure may alter the chemical composition of sensor surfaces or degrade protective coatings, leading to irreversible changes in sensor response.

4.2. Effects on Measurement Systems

The impact of hydrogen-induced drift is highly dependent on the architecture of the measurement system. Pressure transducers, for example, are particularly sensitive due to the combination of thin diaphragm structures and high sensitivity. Studies have shown that zero-point drift of up to several percent of full scale can occur over days of continuous hydrogen exposure [4].

In resistance-based or voltage-output sensors—such as Wheatstone-bridge pressure transmitters or transducers connected to precision voltmeters like the Keithley 2002—drift appears as a slow voltage shift even under constant pressure or flow. This results in the illusion of short-term repeatability, while the long-term trend clearly deviates.

4.3. Mitigation and Characterization Strategies

Understanding and mitigating hydrogen-induced drift requires both material science insight and metrological discipline. Strategies include:

- Material selection: Use of hydrogen-impermeable materials (e.g., stainless steel, certain fluoropolymers) for seals and housings.
- Environmental control: Minimizing ambient hydrogen levels through proper ventilation and isolation.
- Active drift compensation: Implementing baseline correction algorithms, time-based modeling (e.g., exponential decay functions), or real-time dual-channel referencing.
- Stability testing: Conducting long-term drift tests using reference loads or pressures to characterize and quantify drift magnitude and behavior.

Hidden Analytical, for instance, introduced Isothermal Thermal Desorption Spectroscopy (ITDS) as an advanced technique for evaluating hydrogen diffusion in sensor materials with improved reproducibility compared to electropermeation methods [9].

4.4. Metrological Implications

From a metrological standpoint, hydrogen-induced drift necessitates a re-evaluation of measurement uncertainty models. If left uncorrected, the drift must be included in the Type B uncertainty contribution as a systematic bias. In uncertainty budgets, this can dramatically increase the overall standard uncertainty and impact the validity of calibration results or traceability claims [8].

Consequently, measurement repeatability in hydrogen environments cannot be interpreted in isolation. It must be assessed in parallel with stability over time, and with an understanding of the physical interaction between hydrogen and the sensor system. The next section will build on these insights and propose approaches to reinterpret repeatability metrics in such drift-affected conditions.

5. Consequences for the Interpretation of Repeatability and Mitigation Strategies

In precision measurement contexts involving time-dependent drift—especially hydrogen-induced drift—traditional concepts of repeatability require careful reinterpretation. Repeatability, as conventionally defined, assumes that repeated measurements reflect the same physical conditions. However, when drift is present, systematic changes may occur between measurements, even if all external parameters appear constant. This leads to potentially misleading conclusions about measurement quality, uncertainty, and calibration validity.

5.1. When Is Repeatability No Longer “Repeatable”?

Consider a system showing excellent short-term precision (low standard deviation) over a few minutes. Over hours or days, however, the same system might exhibit measurable baseline drift, driven by hydrogen diffusion or environmental interaction. In such cases, reported repeatability values may:

- Underestimate total uncertainty,
- Obscure long-term instability,
- Provide a false sense of confidence in measurement reproducibility.

Therefore, the context of the measurement duration and mechanism of drift must be explicitly considered when evaluating repeatability in hydrogen-sensitive environments.

5.2. Practical Consequences in Laboratory Applications

In metrology laboratories, drift-related issues affect not only routine testing, but also:

- Calibration intervals: If drift is significant, shorter recalibration cycles may be required.
- Control charts and acceptance limits: Stable repeatability metrics may mask time-dependent signal drift, affecting decision thresholds.
- Validation protocols: Repeatability tests must be complemented with long-term stability evaluations, especially for gas-phase analytes or permeation-prone systems.

These considerations are especially critical in hydrogen-related research, fuel cell diagnostics, and gas metrology, where long-duration testing is common [10].

5.3. Strategies for Interpretation and Compensation

Several approaches shown in Table 1 can support a more robust evaluation of repeatability under drift-affected conditions:

Tables 1 *Evaluation of repeatability under drift-affected conditions*

Factor	Impact on Repeatability	Recommended Action
Hydrogen diffusion/permeation	Baseline shift, slow signal offset	Use low-permeability materials, limit hydrogen exposure
Time-dependent drift	Apparent loss of repeatability over long periods	Apply trend analysis (regression, EWMA), re-zeroing protocols

Signal hysteresis or memory effect	Variability depending on recent signal history	Include conditioning steps; discard early readings
Instrumental thermal drift	Drift induced by ambient or self-heating	Allow warm-up time, apply thermal compensation
Operator-dependent variability	Measurement inconsistencies in manual procedures	Automate measurement; apply standardized procedures
Calibration drift	Changing instrument response curve over time	Shorter calibration intervals; interleaved reference checks

These strategies serve not only to improve measurement reliability, but also to enable a more honest and transparent uncertainty estimation, which includes drift effects when appropriate.

5.4. Redefining Repeatability in Drift-Affected Environments

To conclude, drift-affected environments—especially those involving hydrogen—challenge traditional repeatability concepts. A more appropriate framework might treat repeatability as temporally constrained, distinguishing between:

- Instantaneous repeatability (short-term, high-frequency measurements),
- Interval repeatability (within fixed, known drift windows),
- Stability-corrected repeatability (after drift removal or compensation).

By adapting terminology and evaluation criteria to account for systematic time-dependent effects, we ensure that repeatability metrics remain meaningful and aligned with real-world performance [11].

6. Conclusion

Repeatability is a cornerstone concept in metrology and measurement science, yet its interpretation becomes increasingly complex in the presence of time-dependent phenomena such as drift. This paper has examined the theoretical foundations of repeatability and explored how long-term test environments—particularly those involving hydrogen—can compromise traditional assumptions of stability and consistency.

Hydrogen-induced drift, resulting from diffusion, permeation, and material interactions, poses a specific and well-documented challenge to measurement systems. Although short-term repeatability may remain high, the cumulative effect of drift over time can distort the measurement process, mislead statistical evaluations, and degrade the overall reliability of results. As demonstrated, this phenomenon affects not only data interpretation, but also calibration strategies, uncertainty estimation, and system validation protocols.

In light of these findings, it is essential to rethink the role of repeatability in drift-prone measurement contexts. A combined approach—incorporating short-term statistical analysis, long-term stability assessment, and physical drift compensation—offers a more complete picture of measurement quality. Such integration enables laboratories to maintain traceability, reliability, and transparency, even under challenging conditions like hydrogen exposure.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Velychko, O.; Gordiyenko, T. (2023). Evaluation of the long-term drift of measuring instruments and standards using time series. *IMEKO TC4 Proceedings*. <https://www.imeko.org/publications/tc4-2023/IMEKO-TC4-2023-01.pdf> (accessed on 15 April 2025)
- [2] Jung, J.K., Kim, I.G., Chung, K.S.; Kim, Y.-I.; Kim, D.H. (2021) Determination of permeation properties of hydrogen gas in sealing materials. *Scientific Reports*, 11, 17367. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96266-y>
- [3] Wetegrove, M., Duarte, M. J., Taube, K., Rohloff, M., Gopalan, H., Scheu, C., Dehm, G., & Kruth, A. (2023). Preventing Hydrogen Embrittlement: The Role of Barrier Coatings for the Hydrogen Economy. *Hydrogen*, 4(2), 307-322. <https://doi.org/10.3390/hydrogen4020022>
- [4] St. Hilaire, S. (2025) How Does Hydrogen Permeation and Embrittlement Affect Pressure Transducers?. from Ashcroft Inc. (n.d.). <https://blog.ashcroft.com/pressure-transducers-hydrogen-permeation> (accessed on 22 June 2025)
- [5] International Vocabulary of Metrology (VIM), 3rd edition, JCGM 200:2012. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf (accessed on 22 June 2025)
- [6] Vocetka, M., Bobovský, Z., Babjak, J., Suder, J., Grushko, S., Mlotek, J., Kryš, V., & Hagara, M. (2021). Influence of Drift on Robot Repeatability and Its Compensation. *Applied Sciences*, 11(22), 10813. <https://doi.org/10.3390/app112210813>
- [7] Bystrov, A., Wang, Y., & Gardner, P. (2022). Analysis of Vector Network Analyzer Thermal Drift Error. *Metrology*, 2(2), 150-160. <https://doi.org/10.3390/metrology2020010>
- [8] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (accessed on 22 June 2025)
- [9] Zafra, A.; Harris, Z.; Korec, E., Martínez-Pañeda E. (2023). On the relative efficacy of electropermeation and isothermal desorption approaches for measuring hydrogen diffusivity. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(3), 1218-1233. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.025>
- [10] Nie, Z.-L.; Wang, J.; Hu, C.-L.; Sun, Y.R.; Cheng, C.-F.; Tan, Y.; Hu, S.-M. (2025). Polarizability of molecular hydrogen and gas metrology. *Physical Review A*, 111(1), 012801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.111.012801>
- [11] Smirnov, Y.F. (2007). Estimation of errors of hydrogen standard time scale preservation. *Measurement Techniques*, 50(8), 293–297. <https://doi.org/10.1007/s11018-007-0064-9>

Estimation of Calibration Uncertainty: A Comparison Between Theory and Practice

Dávid Matusz-Kalász

1* Institute of Physics and Electrical Engineering, University of Miskolc; david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu

Abstract

Determining measurement uncertainty is essential in calibration procedures, as the reliability of measurement results can only be evaluated in the context of their associated uncertainty. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) provides a widely adopted and internationally recognized framework for this purpose. This paper presents the theoretical foundations of calibration uncertainty and illustrates their application through a practical example. The case study involves voltage measurement using a Keithley 2002 digital multimeter to evaluate the output of a pressure transmitter used for monitoring hydrogen gas pressure. By comparing theoretical and practical considerations, the paper highlights both the applicability and the limitations of the GUM methodology in real-world calibration practices.

Keywords: measurement, calibration, uncertainty

1. Introduction

The reliability of measurement results is a cornerstone of both scientific research and industrial practice. The evaluation of calibration uncertainty plays a crucial role in ensuring that data provided by measuring instruments are interpretable, comparable, and traceable to the International System of Units (SI). Measurement uncertainty does not represent an error in the result, but rather the range within which the true value is reasonably believed to lie.

To establish a standardized framework for evaluating and reporting uncertainty, the international community follows the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (commonly referred to as the GUM). This guide provides a structured approach to identifying, quantifying, and combining various sources of uncertainty. It also serves as the methodological foundation of standards such as ISO/IEC 17025, which governs the competence of testing and calibration laboratories.

The purpose of this paper is to present the theoretical principles underlying the calculation of calibration uncertainty based on the GUM methodology and to demonstrate its practical application through a worked example. By comparing theoretical and practical approaches, we aim to highlight common challenges and considerations encountered during real-world measurements [1].

2. Theoretical Background

The concept of measurement uncertainty is fundamental in metrology, as measurement results can only be considered valid and comparable if the associated uncertainty is properly evaluated. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) provides a standardized and internationally accepted framework for identifying, quantifying, and reporting uncertainty.

According to GUM, measurement uncertainty is a parameter associated with a measurement result that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand. Uncertainty does not imply an error, but rather expresses the degree of confidence in the measurement result [1, 2].

2.1. Type A and Type B Evaluations

Uncertainty sources are typically categorized into two types of evaluations:

- Type A evaluation is based on statistical analysis of measured data, such as the standard deviation of repeated measurements or the standard error of the mean. It relies on quantitative data derived from experimentation.
- Type B evaluation is based on other sources of information, such as manufacturer specifications, calibration certificates, technical documentation, or expert judgment. These evaluations are not derived from repeated measurements but are still valid estimates of uncertainty [3].

2.2. Combined Standard Uncertainty

Measurement results are often functions of several input quantities. The individual uncertainties of these inputs contribute to the combined standard uncertainty (denoted as u_c), which is calculated as the square root of the sum of the squared contributions of each input:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (1)$$

where:

$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is the measurement model,

$u(x_i)$ is the standard uncertainty of each input quantity,

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ is the sensitivity coefficient, expressing how sensitive the result is to changes in the input quantity x_i

2.3. Expanded Uncertainty

The expanded uncertainty (denoted as U) provides an interval around the measurement result that is expected to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measurand. It is calculated by:

$$U = k \cdot u_c \quad (2)$$

where k is the coverage factor, typically chosen as $k = 2$, corresponding to a confidence level of approximately 95%, assuming a roughly normal distribution of the uncertainty.

3. Calibration Uncertainty in Practice

The primary goal of instrument calibration is to compare the reading of a device under test with a known and traceable reference (standard), and based on the observed deviation, determine both the measurement error and the associated

uncertainty. Calibration uncertainty arises from the combination of uncertainties related to the reference standard, the device being calibrated, the measurement method, and the environmental conditions.

While the general principles of the GUM apply to calibration, in practice, several specific aspects must be considered when estimating uncertainty in a calibration context [3, 4].

3.1. Typical Sources of Calibration Uncertainty

The most common contributors to calibration uncertainty include:

- Reference standard uncertainty: based on the calibration certificate of the standard used during calibration.
- Readout uncertainty: due to the resolution of the device display or interpretation of an analog scale.
- Environmental effects: such as temperature fluctuations, humidity, and vibrations.
- Repeatability: variations observed when the same measurement is repeated under identical conditions.
- Measurement method and operator influence: including how the device is connected or how precisely the measurement point is set.

3.2. Calibration Uncertainty in Accredited Laboratories

Calibration laboratories, especially those operating under the ISO/IEC 17025 standard, are required to evaluate all relevant components contributing to the overall measurement uncertainty. The result is typically reported as an expanded uncertainty, calculated using a coverage factor of $k = 2$, which corresponds to a confidence level of approximately 95%.

It is important to emphasize that the calibration uncertainty applies only to the condition of the instrument at the time of calibration. It does not automatically represent the uncertainty of the instrument during future use under different conditions.

3.3. Calibration Certificates and Interpreting the Results

The outcome of a calibration is documented in a calibration certificate, which generally includes:

- The measured (indicated) value of the device,
- The corresponding expanded uncertainty,
- The coverage factor and associated confidence level,
- Information on measurement traceability and the applied calibration method.

It is the user's responsibility to evaluate whether the instrument's performance meets the requirements of the intended application. Based on the calibration results, one may decide whether adjustment, recalibration, or replacement of the instrument is necessary.

4. Practical Example: Estimating Calibration Uncertainty Using the Keithley 2002 Multimeter

In the following example, we examine the output voltage of a pressure transmitter designed to measure hydrogen gas pressure. The transmitter provides a linear voltage signal from 0 to 10 V, corresponding to a pressure range of 0 to 10 bar. To measure the output voltage, a Keithley 2002, an 8½-digit high-precision digital multimeter, is used [5].

The goal is to determine the expanded uncertainty of the measured voltage during calibration, taking into account the main sources of uncertainty according to the GUM framework.

4.1. Measurement Setup and Parameters

Basic data of the calculation example:

- Measurand: DC voltage
- Measured value: 5.0000 V (corresponding to 5 bar pressure)
- Instrument: Keithley 2002
 - Resolution: 100 nV
 - Manufacturer specification: $\pm(5 \text{ ppm of reading} + 1 \text{ ppm of range})$
- Reference: Precision calibrator (e.g., Fluke 5720A), uncertainty: $\pm 1.5 \text{ } \mu\text{V}$ ($k = 2$)
- Environmental conditions: stable temperature ($23 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$), negligible temperature effect

4.2. Uncertainty Contributors and Classification

The main contributors to the calibration uncertainty and their respective classifications are summarized in Table 1.

Table 1 *Uncertainty Contributors and Classification*

Uncertainty Source	Type	Value ($\pm$)	Notes
Reference voltage uncertainty	B	$1.5 \text{ } \mu\text{V}$	From calibration certificate ($k=2$)
Keithley 2002 resolution & display noise	B	$2.5 \text{ } \mu\text{V}$	Includes digitization and noise
Short-term repeatability	A	$1.0 \text{ } \mu\text{V}$	Based on repeated measurements
Contact instability (connection)	B	$0.5 \text{ } \mu\text{V}$	Estimated from experience

4.3. Combined Standard Uncertainty Calculation

The combined standard uncertainty is calculated using the root-sum-of-squares method:

$$u_c = \sqrt{(1,5)^2 + (2,5)^2 + (1,0)^2 + (0,5)^2} \text{ } \mu\text{V} \approx \sqrt{9,75} \text{ } \mu\text{V} \approx 3,12 \text{ } \mu\text{V} \quad (3)$$

4.4. Expanded Uncertainty ($k = 2$)

the expanded uncertainty provided by the 4. Equation:

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 3,12 = 6,24 \mu V \quad (4)$$

Thus, the calibrated measurement result can be expressed as:

$$5,0000 V \pm 6,2 \mu V \quad (k = 2,95\% \text{ confidence level}) \quad (5)$$

This practical example demonstrates how to apply the GUM approach in a real-world calibration context, particularly when measuring the voltage output of a hydrogen pressure transmitter with a high-precision multimeter.

5. Comparison of Theory and Practice

The theoretical framework of measurement uncertainty as defined by the GUM provides a structured and transparent approach for evaluating the reliability of measurement results. In practical applications, however, implementing this methodology presents several challenges, particularly when the system under test is complex, or when environmental and operator-related influences are significant.

As demonstrated in the calibration example, the accuracy of uncertainty estimates strongly depends on how well individual contributors are identified and quantified. While the uncertainty of the reference instrument is usually well documented (e.g., in a calibration certificate), other factors—such as connection instability, display noise, or operator handling—often rely on estimates or prior experience.

Another difficulty lies in constructing an appropriate measurement model. In some cases, the relationship between the output and input quantities is not straightforward or may involve nonlinear behavior. Determining sensitivity coefficients (partial derivatives) under these conditions can introduce additional uncertainty into the calculation.

In calibration practice, uncertainty estimates are often based on a worst-case approach, leading to a conservative evaluation of the expanded uncertainty. The purpose is to ensure that the stated uncertainty interval reliably contains the true value at the specified confidence level.

In conclusion, the GUM-based approach is well-suited for estimating calibration uncertainty, provided that practical influences are properly identified, quantified, and documented. Clearly stating measurement uncertainty not only enhances the reliability of instruments but also improves the robustness of technical decision-making and supports compliance with laboratory standards.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

-
- [1] Farrance I, Frenkel R. (2012). Uncertainty of Measurement: A Review of the Rules for Calculating Uncertainty Components through Functional Relationships. *Clin Biochem Rev.*;33(2), 49-75. PMID: 22896744. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3387884/>
- [2] Brosed, F.J.; Aguilar, J.J.; Acero, R.; Santolaria, J.; Aguado, S.; Pueo, M. (2022). Calibration and uncertainty budget analysis of a high precision telescopic instrument for simultaneous laser multilateration. *Measurement*, 190, 110735. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110735>
- [3] Salicone, S. (2022). New Frontiers in Measurement Uncertainty. *Metrology*, 2, 495-498. <https://doi.org/10.3390/metrology2040029>
- [4] Duong, N.T.; Tran, T.S.; Tran, H.T.; Nguyen G.H. (2024). Analysis of measurement uncertainty for verification/calibration of particulate matter measuring instruments using the gravimetric method. *Measurement Science and Technology*, 35, 085801. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad41ff>
- [5] Keithley Instruments/Tektronix. (2024). Model 2002 Calibration Report and specification. Available online: https://xdevs.com/doc/Keithley/2002/cal_n7/XCR_Keithley2002_AS_RETURNED_IG7_OCT_7_2024.pdf (accessed on 3 March 2025)

A HIDROGÉN FIZIKAI ÉS KÉMIAI TULAJDONSÁGAINAK HATÁSA A TÁVADÓK MŰKÖDÉSÉRE

PALLA GYULA

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet; gyula.palla@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén egyre szélesebb körű ipari alkalmazása – a hidrogéngazdaság térnyerésével párhuzamosan – új megbízhatósági és biztonsági kihívásokat támaszt a nyomás- és hőmérséklettávadókkal szemben. Az irodalomkutatás szisztematikusan áttekinti, miként befolyásolja a hidrogén három kulcstulajdonsága – a kivételes diffúziós képesség, a kémiai reakciókészség (ideértve a hidrogénridegülést és redukzív környezet hatásait) és az alacsony viszkozitás – a piezorezisztív, kapacitív, optikai (száloptikás) és hőelemes távadók működését az ipari automatizálásban. Az eredmények szerint a piezorezisztív szenzoroknál a fémmembránon át diffundáló hidrogén nullpont-driftet és élettartam-csökkenést okozhat, ami arányozott membránokkal és hidrogénálló ötvözetekkel mérsékelhető. A kapacitív távadók közül a kerámia, olajmentes mérőcellák lényegesen ellenállóbbak a H_2 -permeációval szemben. Optikai rendszerekben a hidrogén „elsötétedést” és jelcsillapodást idéz elő, amely szénbevonatokkal, H_2 -megkötő rétegekkel és spektrális/hullámhossz-stratégiákkal kezelhető. Hőelemeknél a redukzív közeg a K-típusú termopárok zöld korrózióját, jelentős driftet és mechanikai gyengülést válthat ki; N-típus alkalmazása, védőatmoszféra és gyakoribb kalibráció javasolt. Az alacsony viszkozitás fokozza a szivárgási kockázatot és módosítja a dinamikus csillapítást, ami a szerkezeti tömítések és áramláscsillapítás újragondolását igényli.

Kulcsszavak: hidrogén diffúzió (permeáció); hidrogénridegülés; alacsony viszkozitás (szivárgás); piezorezisztív–kapacitív–optikai–hőelemes távadók; ipari automatizálás

1. Bevezetés

A hidrogén, mint a legkisebb atomsúlyú és egyben egyik legreaktívabb elem, egyre fontosabb szerepet játszik az ipari folyamatokban és az energetikában, különösen a hidrogéngazdaság térnyerésével. A hidrogén gáz számos előnyös fizikai tulajdonsággal rendelkezik: rendkívül kis sűrűségű és alacsony viszkozitású, továbbá az összes gáz közül a legmagasabb fajhőkapacitással és hővezető képességgel bír. E tulajdonságok azonban kihívásokat is jelentenek az ipari nyomás- és hőmérséklet-távadók (érzékelők és mérőátalakítók) számára. A hidrogén diffúziós képessége (könnyen áthatol anyagokon apró molekulamérete miatt), nagy reakciókészsége (például fémekkel szemben, hidrogénridegülést okozva) és alacsony viszkozitása (ami befolyásolja az áramlási és szivárgási jellemzőket) egyaránt hatással vannak a különböző mérőműszerek működésére.

2. A hidrogén diffúziója és permeációja

A hidrogénmolekula kicsiny mérete lehetővé teszi, hogy sok szilárd anyag szerkezetén áthatoljon – ezt a jelenséget diffúciónak vagy permeációnak nevezzük. A nyomásmérő távadók esetén ez különösen problémás lehet, mivel a legtöbb érzékelőben a mérőelem egy vékony fémmembránon keresztül kerül kapcsolatba a mérendő közeggel. Magas nyomás és

hőmérséklet esetén a H_2 molekulák disszociálódhatnak atomos hidrogénné, amely képes átjutni a fémmembrán rácsszerkezetén [1][2]. Az így a szenzor belsejébe került hidrogén aztán újból molekulává egyesülhet a szenzor töltőközegében vagy üregeiben. Ennek következménye a szenzor kimeneti jelének lassú eltolódása vagy nullpont-driftje, illetve súlyos esetben a mérőcella meghibásodása [1].

Egy tipikus olajjal töltött piezorezisztív nyomásérzékelőnél például a hidrogén átdiffundál a vékony acél membránon, bejut az olajtöltetbe és a szilícium chip üregébe, ahol hidrogénbuborékok formájában felhalmozódik [1]. Ez a jelenség a mérőeszköz nullpontjának eltolódását, a kimeneti jel hibáját okozza, és idővel maradandó károsodáshoz is vezethet [1]. A szakirodalom szerint az ilyen kialakítású nyomástávadók hosszú távú használatra alkalmatlanok tiszta hidrogén közegben, különösen magas hőmérsékleten, mert a diffúzió gyorsul és a hiba felhalmozódik [2]. Még megfelelő védőbevonatok (pl. arany réteg) alkalmazásával is csak késleltetni lehet a problémát, de a hagyományos felépítésű érzékelők tervezési korlátai miatt a hidrogén átszivárgása idővel jelentős gondot okoz [2].

Fontos megjegyezni, hogy nem minden érzékelő-membrán egyformán áteresztő a hidrogénre. A kerámia membránok például jóval kevésbé átjárhatók a H_2 molekulák számára. Egy száraz (olajmentes) kerámia érzékelőcellánál a hidrogén gyakorlatilag nem tud átjutni a kerámia membránon, és mivel nincs folyadéktöltet, nem képezhet buborékot [3]. Ezért a kerámia alapú nyomáscellák ígéretes megoldást jelentenek a hidrogén permeációs problémáinak csökkentésére, és gyakran alkalmazzák őket olyan ipari nyomástávadókban, amelyeket kifejezetten hidrogénhez terveztek [3].

3. Hidrogénreakciók és anyagkárosító hatások

A hidrogén nemcsak fizikailag képes behatolni az anyagokba, hanem kémiai is kölcsönhatásba lép velük. Az egyik legismertebb jelenség a hidrogén okozta ridegedés (hidrogén-embrittlement), amely során az anyag (különösen a nagy szilárdságú acélok és egyes fémötvözetek) szívóssága és alakváltozó képessége drasztikusan lecsökken a diffundáló hidrogén hatására [4]. A hidrogénatomok beépülnek a fémrácsba, és molekuláris hidrogén formájában rekednek meg, mikrorepedéseket és rideg törést okozva. A folyamat definíciója szerint az atomos hidrogén csökkenti a fém törési szívósságát vagy alakíthatóságát, ami a gyakorlatban anyagfáradáshoz és törékennyé váláshoz vezet [4]. Ennek következtében a hidrogénnel érintkező érzékelők membránjai és más fém alkatrészei idő előtt meghibásodhatnak, különösen mechanikai feszültség (nyomás) alatt [1].

A hidrogénreakció másik aspektusa, hogy kémiai reakciókba léphet az érzékelő anyagával vagy bevonataival. Szerencsére a hidrogén önmagában nem korrozív, de magas hőmérsékleten redukáló közegként viselkedik, ami befolyásolhatja például az érzékelők oxidvédő rétegeit. Egy tipikus példa a termopárok (hőelemek) esetében figyelhető meg: a Ni-Cr (K-típusú) termopár pozitív szála normál esetben védő oxidréteggel passzíválódik levegőben. Hidrogénben vagy redukatív légkörben magas hőmérsékleten (800–1100 °C) azonban ez a védő oxidréteg nem tud kialakulni, illetve a króm szelektív oxidációja inkább a szál belsejében megy végbe [5]. Ezt a jelenséget “zöld korrózió” (green rot) nevezik, melynek során a króm kiég a termoszálból. Az eredmény a termopár termoelektromos feszültségének csökkenése, jelentős mérési driftet okozva [5]. A folyamat előrehaladtával a termopár egyre nagyobb negatív hibát ad (akár több tucat fokos eltéréssel), végül a szálak rideggé válnak és eltörhetnek. Összességében elmondható, hogy a hidrogén kémiai reakciókészsége miatt az érzékelők anyagai (fémek, ötvözetek) speciális kivitelűek vagy védettek kell legyenek hidrogénben történő használatkor – például magas nikkeltartalmú acélok alkalmazásával csökkenthető a ridegedés mértéke [6], illetve aranybevonattal megakadályozható a hidrogén behatolása és a káros reakciók [4].

4. A hidrogén alacsony viszkozitásának hatása

A hidrogén viszkozitása alacsonyabb, mint a legtöbb közönséges gázé (például a levegőé). Ennek a tulajdonságnak több következménye van a műszerek szempontjából. Először is, a hidrogén könnyebben szivárog át apró réseken és tömítéseken, mivel alacsony viszkozitása és kis molekulamérete miatt kisebb az áramlási ellenállása. Egy hagyományos nyomástávadó esetén, ha menetes illesztéseknél vagy O-gyűrűs tömítéseknél minimális hézag van, a hidrogén átjutása jóval valószínűbb, mint pl. egy nagyobb molekulájú és viszkozusabb gáznál. Ez arra kényszeríti a gyártókat, hogy hidrogénes alkalmazásoknál hegesztett tömítettségű, résmentes konstrukciókat és speciális polimer tömítőanyagokat alkalmazzanak, amelyek minimálisra csökkentik a szivárgást.

Másrészt a hidrogén kis viszkozitása befolyásolja az érzékelők dinamikus viselkedését is. Nyomás-távadóknál gyakran alkalmaznak csillapító kapillárisokat vagy szűkítéseket a nyomáslökések tompítására. Hidrogén esetén a folyadékszerűen alacsony sűrűség és viszkozitás miatt az ilyen csillapítás kevésbé hatékony lehet: a hidrogén gyorsabban kiegyenlíti a nyomást a szűkítéseken keresztül, így a mérőelemre ható nyomásingadozások csillapítása kihívást jelenthet. Ezt ellensúlyozandó, a gyártók kisebb átmérőjű kapillárisokat vagy állítható csillapítást alkalmazhatnak hidrogénhez tervezett műszerekben.

Harmadrészt, a hidrogén magas hővezetése és alacsony viszkozitása kombináltan hat a hőmérséklet-érzékelők hőátadására. Mivel a hidrogén könnyebben cirkulál és vezeti a hőt, egy hőelem vagy ellenállás-hőmérő (RTD) hidrogén közegben gyorsabban reagálhat a hőmérséklet változására, ugyanakkor a természetes konvekciós hűtés erősebb lehet. Ez azt jelenti, hogy a szenzor kalibrációját érdemes adott közegben (pl. levegő vs. hidrogén) elvégezni a legnagyobb pontosság érdekében, mivel a hőátadási körülmények eltérhetnek. Összességében a hidrogén alacsony viszkozitása miatt a műszaki tervezésben nagyobb hangsúlyt kap a szivárgásmentesség és a megfelelő csillapítás, valamint figyelembe kell venni a hőátadási sajátosságokat is.

5. Piezorezisztív nyomástávadók hidrogén közegben

A piezorezisztív elven működő nyomástávadók tipikusan egy rugalmas membránt és rá integrált vagy mögé épített rezisztív nyúlásmérőket (pl. szilícium alapú nyúlásmérő híd) tartalmaznak. A nyomás hatására a membrán deformálódik, ami változtatja a nyúlásmérők ellenállását, és így elektromos jellé alakítja a nyomást. Hidrogén közegben azonban a szenzorok működését több tényező is megzavarhatja:

Hidrogén-permeáció a membránon: Ahogy korábban kifejtettük, a piezorezisztív szenzorok vékony acélmembránján a hidrogén képes átjutni. A hagyományos, olajjal töltött kiviteleknel a hidrogén bejut a szilícium érzékelőcella üregébe és az olajtérbe, hidrogénbuborékokat képezve, ami a nullpont eltolódását és hibás nyomásértékeket eredményez [1]. Ez a hiba folyamatos nyomás alatt fokozatosan növekszik, és a szenzor idő előtti meghibásodásához vezethet.

Anyagfáradás és ridegedés: A piezorezisztív érzékelők membránja és a hozzá kapcsolódó szerkezeti elemek (pl. töltőfolyadékot elzáró fém ház) jellemzően rozsdamentes acélból készülnek. A hidrogén belépve a fémrészecskébe rideggé teszi az anyagot, azaz csökkenti a rugalmas alakváltozásra való képességét [4]. Idővel mikroropedések alakulhatnak ki, amelyek rontják a membrán rugalmasságát és mérési pontosságát, sőt szivárgáshoz is vezethetnek. A magasabb nikkeltartalmú acéltövezetek alkalmazása bizonyos mértékig csökkenti a hidrogén okozta ridegedést [6], ezért a hidrogénre specializált távadók gyártói gyakran ilyen anyagokat választanak.

Kalibrációs és stabilitási kihívások: Mivel a hidrogén diffúziója függ a hőmérséklettől, a piezorezisztív szenzorok hőmérsékletfüggő driftje jelentős lehet hidrogénben. Különösen magas üzemi hőmérsékleteken (150 °C felett) a diffúzió felgyorsul [2], így az érzékelő nullpontja és szenzitivitása is gyorsabban változhat az idő függvényében. Ezt a gyakorlatban rendszeres újrakalibrálással vagy alternatív mérési elv alkalmazásával lehet ellensúlyozni.

Mit lehet tenni a piezorezisztív érzékelők védelmében? Az egyik megoldás a membrán felületének speciális bevonata, tipikusan aranyozása. Az arany rendkívül kis hidrogén-áteresztéssel bír, és kémiaiilag inert a hidrogénnel szemben. Az aranybevonatú membrán nagyságrendekkel csökkenti a hidrogén diffúzióját az acélba, így védi a mögöttes érzékelőelemet [4]. Emellett az arany meggátolja a hidrogén okozta ridegüldést is az acélban, mivel fizikai gátként működik [4]. Számos ipari nyomástávadó-gyártó kínál kifejezetten hidrogénmérésre szánt piezorezisztív szenzorokat aranyozott vagy speciális ötvözetű membránnal – ezek a megoldások megnövelik az érzékelő élettartamát és stabilitását hidrogénben [4].

Összefoglalva, a piezorezisztív nyomástávadók hidrogénkörnyezetben történő alkalmazásához körültekintő tervezés és anyagválasztás szükséges. A hidrogén diffúziójának minimalizálása (pl. aranyozott membránnal), a ridegedésre kevésbé hajlamos anyagok használata (nikkelgazdag acélok, speciális ötvözetek), valamint a rendszeres karbantartás és kalibrálás mind hozzájárulnak a megbízható működéshez ebben a kihívást jelentő közegben.

6. Kapacitív nyomástávadók hidrogén közegben

A kapacitív nyomásérzékelők működése azon alapul, hogy a nyomás hatására elhajló membrán és egy fix ellen-elektroda alkotta kondenzátor kapacitása megváltozik. A mérőjel a kapacitásváltozásból származik. Szerkezetükben hasonlítanak a piezorezisztív típusokra annyiban, hogy van egy rugalmas membrán, amely általában fém vagy kerámia, és ezt gyakran egy zárt üregben lévő referencialégnomáshoz viszonyítva mérik. Hidrogénes alkalmazásban a kapacitív érzékelők problémái és megoldásai részben átfedik a piezorezisztíveknél tárgyaltakat:

Ha a kapacitív szenzor fémmembrános és olajjal töltött (néhány kialakítás ilyen, főleg nagy nyomásokra tervezve), akkor ugyanúgy fennáll a hidrogén permeáció veszélye a membránon át. A hidrogén bejuthat az olajtérbe, ahol buborékot képezhet, megváltoztatva a kapacitást és nullponteltolódást okozva. Ilyen esetekben hasonló védelmi intézkedések szükségesek, mint a piezorezisztív érzékelőknél: például aranyozott membrán vagy hidrogénálló fémötvözet alkalmazása a diffúzió mérséklésére.

Számos kapacitív nyomáscella azonban olajmentes, száraz mérőcella kerámia membránnal. Ezek kimondottan előnyösek hidrogénhez, mivel a kerámia (pl. alumínium-oxid kerámia) sokkal zártabb rácsszerkezetű, így a hidrogén molekulák nem diffundálnak át rajta és nem reagálnak vele [3]. Még ha a kerámia érzékelők peremén található O-gyűrű tömítésen át be is szivárog csekély mennyiségű hidrogén, a száraz kialakítás miatt nincs folyadék, amiben buborék képződhetne, így a hidrogén nem tud kárt tenni a mérésben [3]. Ráadásul a kerámiát a hidrogén kémiaiilag sem károsítja számottevően, ellentétben egyes fémekkel.

A hidrogén okozta ridegedés a kerámiáknál nem releváns, hiszen a kerámia membránok nem fémesek. Ahol viszont a kapacitív szenzor részei fémből vannak (például a perem vagy a ház), ott ezek anyagának megválasztása fontos. Gyakran alkalmaznak rozsdamentes acél ház helyett speciális ötvözeteket vagy bevonatokat a kerámia cellák köré is, hogy a csatlakozásoknál se okozzon problémát a hidrogén behatolása vagy ridegítése.

A kapacitív távadók esetén tehát a hidrogén leginkább akkor jelent gondot, ha a kialakításuk fém membránra és folyadéktöltetre épül. A modern, hidrogénhez szánt kapacitív szenzorok zöme azonban kerámia technológiájú, ami természetes védelmet nyújt a hidrogénnel szemben. Ilyen szenzorok használatával a hidrogén miatti nullpontvándorlás és

drift minimálisra csökkenthető, amit a gyártók és független tesztek is igazolnak. Például az Endress+Hauser esettanulmánya kimutatta, hogy a kerámia membrános nyomáscelláknál még hosszú távon sem tapasztalható hidrogén okozta jelhiba, szemben a fémmembrános társaikkal [3].

Összességében a kapacitív nyomástávadók megfelelő kiválasztás esetén (különösen kerámia érzékelőelem alkalmazásával) nagyon jól használhatók hidrogén közegben, mivel tervezési szinten kiküszöbölhető a hidrogén diffúzió legtöbb negatív hatása. Természetesen itt is ügyelni kell a tömítésekre és a szerkezeti anyagokra, de a mérési elv maga kevésbé szenved a hidrogén tulajdonságaitól, mint a piezorezisztív esetben.

7. Optikai szenzorok (száloptikás távadók) és a hidrogén hatása

Az utóbbi években az optikai elven működő érzékelők – különösen a száloptikás szenzorok, mint például a Fiber Bragg rácsos (FBG) érzékelők vagy az optikai szálal elosztott hőmérsékletérzékelők (DTS) – egyre inkább elterjedtek az ipari mérés- és automatizálástechnikában. Ezen eszközök egyik vonzereje, hogy elektromosan passzívak a mérőhelyen, azaz nem szikráznak, ezért elvileg ideálisak lehetnek hidrogén jelenlétében (mivel a hidrogén gyúlékony). Ugyanakkor a hidrogén fizikai-kémiai hatása az optikai szálakra is figyelmet érdemel, különösen a tartós alkalmazásoknál.

A legjelentősebb jelenség az úgynevezett hidrogén elsötétedés (hydrogen darkening). A szilícium-dioxid alapú optikai szálakban a szabad hidrogénatomok képesek beépülni a szál anyagába, és kémiaiilag kötődnek a SiO_2 hálózathoz. Ennek eredményeként hidroxil (OH) csoportok jönnek létre az üvegben [7]. A keletkező OH csoportok erősen elnyelik az infravörös fényt, és ez az optikai veszteség a fényáteresztő képesség romlásához, azaz az optikai jel “elsötétedéséhez” vezet [7]. Gyakorlatilag a hidrogénnel átitatott szál jelcsillapítása megnő, torzítva vagy teljesen ellehetetlenítve a mérést.

Ez a probléma különösen kritikus olyan alkalmazásokban, ahol az optikai szálal hidrogénben vagy hidrogént termelő közegben (például olaj- és gázkutakban) használják hőmérséklet profil mérésére. Ilyen környezetben a szénhidrogének bomlása során is felszabadulhat hidrogén, amely beszívárog a szálba [7]. Magasabb hőmérsékleten a sötétedés felgyorsul, mivel a diffúzió és a reakciók sebessége nő [8]. Ennek következtében egy optikai kábel néhány napon vagy héten belül elveszítheti a mérőképességét, ha nincs ellátva védelmi megoldásokkal. Egy iparági szakértő találóan úgy fogalmazott: “A hidrogén sötétedés olyan, mint a halál és az adók; előbb-utóbb bekövetkezik” [8] – vagyis hosszú távon mindenképp számolni kell vele megfelelő ellenintézkedések hiányában.

A védekezés több szinten történhet. Az optikai szálakat gyártáskor speciális bevonatokkal (pl. szénbevonat) látják el, amelyek gátolják a hidrogén bejutását [9]. Emellett hidrogénmegkötő anyagokat (például gél formájában) helyezhetnek el a kábelben, amelyek “csapdába ejtik” a bejutó hidrogénatomokat még mielőtt azok elérnék a szálmagot [9]. Az optikai anyag összetételén is változtathatnak: bizonyos adalékokkal kevésbé érzékennyé tehető a szál az OH-képződésre. Végül, de nem utolsó sorban, optikai spektrum trükkökkel is lehet enyhíteni a hatást: például olyan hullámhosszon működtetik a rendszert, amit kevésbé befolyásol a hidrogén okozta elnyelés [8]. Halliburton egy kétfélezes technikát fejlesztett ki, ahol a mérés részben egy olyan hullámhosszon történik, amely távol esik a hidrogén abszorpciós sávjától – így a szál akkor is használható marad, ha közben némileg sötétedik [8].

Az optikai (száloptikás) szenzorok tehát önmagukban jó alternatívát jelentenek hidrogénben a robbanásbiztonság szempontjából, de anyagi stabilitásukról gondoskodni kell. A hidrogén sötétítő hatása miatt e szenzorok kalibrációs görbéje megváltozhat, érzékenyséjük csökkenhet az idővel. A fejlesztések azonban folyamatosak, és mára elmondható, hogy megfelelő védelmi intézkedésekkel (bevonatok, szűrőanyagok, intelligens spektrumhasználat) az optikai távadók hosszú távon is üzemeltethetők hidrogénkörnyezetben anélkül, hogy mérési pontosságuk jelentősen romlana [8].

8. Hőelemes (termopáros) hőmérséklet-távadók hidrogén közegben

A hőelemes távadók – például a gyakran alkalmazott K-típusú termopár (Ni-Cr vs. Ni-Al ötvözetpár) – széles körben használatosak magas hőmérsékletek mérésére ipari kemencékben, turbinákban, stb. Hidrogén jelenlétében azonban ezek az eszközök számos kihívással szembesülnek, főként a már korábban említett kémiai hatások miatt:

Zöld korrózió és krómkiégés: Reduktív, hidrogéndús légkörben a K-típusú termopár pozitív szála (Ni-Cr, más néven króm) szelektív krómoxidációt szenved. Mivel nincs elegendő oxigén a környezetben, hogy felületén védőréteget alkosson, a króm belül oxidálódik (a környező anyagból vonódik ki) [5]. Ez a Ni-Cr szál összetételét megváltoztatja, csökkentve a termoelektromos feszültségét. Az eredmény egy driftelő hőelem, mely egyre alacsonyabb hőmérsékletet jelez a valóságosnál (negatív irányú eltérés) [5]. A jelenség lassan kezdődik, de ha sokáig észrevétlen marad, akár 50°C-os vagy nagyobb hibákat is okozhat [5]. Emellett a megmart, krómvesztett szál elszíneződik zöldes árnyalatúra – innen a jelenség neve –, és megtörik a duktilitása, azaz rideggé, törékennyé válik [5].

Anyagridegedés és mechanikai károsodás: A hidrogén nemcsak a króm kiégése révén károsítja a termopárt, hanem közvetlenül is diffundálhat a fém vezetősálakba, különösen ha azok magas hőmérsékleten vannak kitéve. A hidrogén okozta kisebb méretű diffúzió pórusokat, üregeket hozhat létre a fémrácsban, vagy reakcióba léphet a fémötvözet komponenseivel (pl. alumíniummal, ha van a Ni-Al szálaban). Ez hosszabb távon strukturális gyengülést eredményez. Például magas hőmérsékleten (1000 °C környékén) a Ni-Al szál alumíniumtartalma reagálhat a hidrogénnel és csökkenhet, ami szintén a termoelem jelváltozásához vezethet.

Kalibráció és tartósság: A hidrogénes környezetben használt hőelemek gyorsabban elveszíthetik kalibrációjukat, mint inertebb gázokban vagy levegőben. A drift miatt gyakoribb kalibráció vagy cserék szükségesek, ami növeli a karbantartási költségeket. Szélsőséges esetben a hőelem szálai eltörhetnek (pl. a zöldkorrózió miatti ridegség okán), ilyenkor az érzékelő teljesen kiesik (nyílt áramkörű lesz) [5]

Mit tehetünk a hőelemek védelmében? Néhány lehetséges stratégia a szakirodalom és az ipari tapasztalat alapján:

Megfelelő termopár típus választása: A K-típus helyett N-típusú termopár (Ni-Cr-Si vs. Ni-Si, más néven Nicrosil-Nisil) alkalmazása javasolt hidrogénes, magas hőmérsékletű közegben [5]. Az N-típus szilíciumot tartalmaz, ami stabilabb oxidréteget képez még alacsony oxigéntartalmú környezetben is, így ellenállóbb a zöld korrózióval szemben.

Védőgáz vagy védőburkolat használata: Ha lehetséges, a termopár védőcsövét inert gázzal (pl. argonnal) öblítik át vagy minimális oxigént adagolnak hozzá [5]. Ezzel biztosítják, hogy a termopár környezetében ne alakuljon ki erősen redukzív légkör, ami a krómkiégést okozza. Bizonyos kemencékben például nitrogén/hidrogén keveréknél vigyáznak a harmatpont szabályozására, hogy elkerüljék a túl száraz (oxigénszegény) hidrogén közeget [5].

Anyag- és szerkezetmódosítás: Léteznek speciális, hidrogénálló termopár konstrukciók, például titán “áldozati” szállal kiegészített K-típus, ahol a titán előbb reagál a hidrogénnel, védve a fő termoelektromos szálát (ezzel csak késleltetni lehet a folyamatot) [5]. Vagy teljesen eltérő anyagú hőelem, pl. nem fémes magas hőmérséklet-érzékelők (mint a wolfram-rénium termopár, amely még magasabb hőfokon működik, bár az is érzékeny lehet hidrogénre más módon). Kerámia védőhüvelyek alkalmazása is segíthet elszigetelni a termopárt a hidrogéntől, bár a hővezetés miatt a válaszdő romolhat.

Összefoglalva, a hőelemes távadók hidrogénben való alkalmazása megoldható, de fokozott figyelmet igényel. A megfelelő termopár kiválasztása (lehetőleg hidrogénállóbb típus), védő atmoszféra vagy bevonatok használata, valamint a rendszeres

ellenőrzés és kalibráció kulcsfontosságú a pontos hőmérsékletmérés fenntartásához. Az ipari automatizálásban, ahol a biztonság és megbízhatóság elsődleges, gyakran kombinálják is ezeket a módszereket a hidrogén okozta meghibásodások elkerülése érdekében.

9. Összefoglalás

A hidrogén alapú ipari automatizálás területén – legyen szó üzemanyagcellás energiatermelésről, vegyipari folyamatokról vagy akár hidrogén töltőállomásokról – elengedhetetlen a megfelelően tervezett és anyagválasztású szenzorok alkalmazása. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a hidrogén különleges tulajdonságainak figyelembe vétele már a tervezés korai fázisában kulcsfontosságú. Az irodalomban fellelhető megoldások – úgymint az aranyozott vagy kerámia membránok, a magasabb nikkeltartalmú ötvözetek, a szénbevonatú optikai szálak, vagy a speciális termopár anyagok – mind azt célozzák, hogy a hidrogén mérését biztonságosan és pontatlanodás nélkül lehessen megvalósítani akár hosszú távon is. A fejlődő hidrogéngazdaságban csak az a mérőrendszer lesz tartós és megbízható, amely ellenáll a hidrogén diffúziójának, nem lép vele káros reakcióba, és képes kezelni a hidrogén által teremtett egyedi fizikai környezetet. Ennek eléréséhez a multidiszciplináris megközelítés – anyagtudomány, kémia és érzékelőtechnika összehangolása – elengedhetetlen.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

HIVATKOZÁSOK:

Ashcroft. (n.d.). *Hidrogén permeáció és törékenység hatása a nyomástávadókra* [Magyar nyelvű tájékoztató, fordítás]. Merker 2007. Elérhető: <https://webshop.merker2007.hu>

Gramich, J., et al. (2023). Piezoresistive pressure sensor technology for hydrogen applications at high temperatures. In *SMSI 2023 Conference – Sensor and Measurement Science International* (Abstract). AMA Science. Elérhető: <https://ama-science.org>

Endress+Hauser. (n.d.). *Hydrogen permeation is destructive to pressure transmitters* [Esettanulmány]. Elérhető: <https://us.endress.com>

Nanjing Wotian Technology. (2024). *Why stainless steel diaphragms are gold plated when measuring hydrogen in pressure transmitters?* [Műszaki ismertető]. Elérhető: <https://wtsensor.com>

Thermal Resource Management. (n.d.). *The Green Rot Phenomenon* [Hőkezelő ipari esettanulmány a K-típusú termopárok hidrogénes korróziójáról]. Elérhető: <https://thermal-resources.com>

Techmonitor. (2024). Digitális nyomásmérők hidrogénalkalmazásokhoz – KELLER LEO-Record-H2 bemutatása. *Techmonitor.hu*. Elérhető: <https://techmonitor.hu>

Wikipedia. (n.d.). *Hidrogén – Fizikai tulajdonságok* [Szócikk]. In *Wikipédia*. Elérhető: <https://hu.wikipedia.org>

Journal of Petroleum Technology. (2014). Fiber optics: Overcoming hydrogen darkening. *JPT – Journal of Petroleum Technology*. Elérhető: <https://jpt.spe.org>

Wikipedia. (n.d.). *Hydrogen darkening* [Szócikk]. In *Wikipédia*. Elérhető: <https://en.wikipedia.org>

A MÉRŐESZKÖZÖK KALIBRÁLHATÓSÁGÁNAK IRODALMI ÁTTEKINTÉSE – SENZORVÁLASZTÁSI SZEMPONTOK

PALLA GYULA

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet; gyula.palla@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogénes ipari alkalmazásokban a szenzorok kalibrálhatósága közvetlenül befolyásolja a biztonságot, a folyamatirányítás pontosságát és a jogszabályi megfelelést. Az irodalmi metrológiai nézőpontból rendszerezi a kalibrálható szenzorok kiválasztásának elvi szempontjait. Bemutatja, hogy a mérési tartomány és kimutatási határ, pontosság/precizitás, linearitás, ismételhetőség–reprodukálhatóság, hiszterézis, hosszú távú stabilitás és drift, továbbá a válaszütem és szelektivitás hogyan határozzák meg a kalibráció megvalósíthatóságát és nyomonkövethetőségét. Kiemeli a hidrogén sajátosságainak (diffúzió/permeáció, reakciókészség, alacsony viszkozitás) kalibrálhatóságra gyakorolt hatását, amelyek anyagválasztási és konstrukciós következményekkel járnak. Összeveti a fő érzékelőplatformokat (katalitikus, elektrokémiai, félvezető/MOX, termikus vezetőképességű, palládium-alapú és optikai megoldások) a kalibrálási protokoll, a driftkezelés és az in-situ, nem invazív kalibráció lehetőségei szerint. Az optimális szenzorválasztás olyan metrológiai profilt és üzemeltetési ökoszisztémát igényel, amely minimálisra csökkenti a driftet, biztosítja a gyors, szelektív választ, és támogatja a rendszeres, nyomonkövethető kalibrálást hidrogénben.

Kulcsszavak: kalibrálhatóság; metrológiai nyomonkövethetőség; hidrogénszenzor-választás; drift és hosszú távú stabilitás; szelektivitás és válaszütem

1. Bevezetés

A hidrogénnel kapcsolatos ipari alkalmazásokban kiemelten fontos a megbízható szenzortechnológia, hiszen a hidrogén rendkívül gyúlékony gáz, szivárgása pedig komoly biztonsági kockázatot jelent. Ahhoz, hogy a hidrogénérzékelők pontos és megbízható adatokat szolgáltatassanak, elengedhetetlen a megfelelő kalibrálhatóság – vagyis annak biztosítása, hogy a szenzor által jelzett értékek a valós (etalon által nyomon követhető) értékekhez köthetők legyenek. A kalibrálás, mint metrológiai tevékenység biztosítja, hogy a műszer helyesen mérjen, ugyanakkor önmagában nem azonos a hitelesítéssel, amely joghatású megfelelőség-ellenőrzés [1].

A hidrogén sajátos tulajdonságai (alacsony sűrűség, nagy diffúziós képesség, széles robbanási koncentrációtartomány) miatt a megfelelő érzékelők kiválasztása és rendszeres kalibrálása kulcsfontosságú a biztonságos üzemeltetéshez [3][6]. Az ipari gyakorlatban – például akkumulátortöltő helyiségekben, hidrogéntöltő állomásokon, üzemanyagcella-rendszerekben – a szenzorokat gyakran integrálják a biztonsági vezérlőrendszerekbe, így hibás mérés esetén automatikus riasztások vagy beavatkozások történhetnek [3].

Az ISO 26142:2010 nemzetközi szabvány [2] előírja a hidrogén-detektorokkal szembeni alapvető termékjellemzőket és tesztmódszereket, beleértve a precizitást, válaszütemet, stabilitást, mérési tartományt, szelektivitást és a mérőanyagokkal

szembeni ellenállást. A kalibrálhatóság tehát nem csupán mérésügyi, hanem iparbiztonsági és szabvány-megfelelőségi követelmény is.

2. Metrológiai követelmények hidrogénszenzorokhoz

A hidrogénérzékelők tervezése és kiválasztása során számos metrológiai paramétert kell figyelembe venni annak érdekében, hogy a szenzor kalibrálható legyen és a gyakorlatban is megbízhatóan működjön. A szakirodalom egybehangzóan kiemeli, hogy a következő teljesítményjellemzők a legfontosabbak [3][4][6]:

Mérési tartomány és kimutatási határ: A szenzornak le kell fednie a kívánt koncentrációtartományt, megfelelő felbontással és alsó detektálási határral (LDL). Biztonsági szempontból tipikusan a robbanási alsó határ (LEL) közelében lévő koncentrációt kell érzékelni, míg folyamatirányításban akár százalékos szintű H_2 -mérésekre is szükség lehet [4][6].

Pontosság és precizitás: A mérési bizonytalanság legyen minimális. Ipari hidrogénérzékelőknél elvárás, hogy a mérési hiba legfeljebb 5–10% legyen a mért jelhez képest. A jó ismétlőképesség és reprodukálhatóság is alapvető: ugyanazon feltételek mellett ismételt mérések közel azonos eredményt adjanak [1][3].

Válaszidő: A gyors detektálás kritikus biztonsági tényező. Az ISO 26142 és más szabványok szerint a hidrogénszivárgás-érzékelőknek jellemzően <10 másodperces válaszidővel kell rendelkezniük, míg fejlett rendszerek esetében az <1 másodperces reakcióidő az elvárt [2][6].

Szelektivitás: A hidrogénszenzor ideális esetben szelektíven reagál a hidrogénre. A gyakorlatban azonban sok érzékelő mutat keresztérzékenységet (pl. a félvezető érzékelők reagálnak metánra, CO-ra, alkoholokra is). Ennek mérséklésére fejlesztettek ki palládium- és nemesfém-alapú megoldásokat [4][6][7].

Stabilitás és drift: A hosszú távú stabilitás és az alacsony drift kiemelt követelmény. Egyes érzékelőtípusok (pl. elektrokémiai cellák) hajlamosak érzékenységük csökkenésére vagy nullpont-eltolódásra, míg mások (pl. optikai vagy palládiumréteg-alapú érzékelők) évekig stabilak maradhatnak [5][11].

Környezeti behatásokra való érzékenység: A hőmérséklet, páratartalom és nyomásváltozások jelentősen befolyásolhatják a szenzor jelét. Az ipari környezetekben használt érzékelőknek ezért hőmérséklet-kompenzációval, robusztus tokozással és rezgésálló kialakítással kell rendelkezniük [2][8].

Élettartam és karbantartás: Az iparban elvárt élettartam több év (DOE ajánlások szerint legalább 5 év [6]), a kalibrálás gyakorisága pedig tipikusan félévente–évente javasolt. Bizonyos kritikus alkalmazásokban napi funkcióellenőrzést (bump teszt) is előírnak [9][10].

A felsorolt paraméterek határozzák meg, hogy egy adott szenzor mennyire alkalmas nyomon követhető kalibrációra, és hogy a mérési eredmények megfelelnek-e a szabványok és biztonsági előírások által elvárt megbízhatósági szintnek.

3. Hidrogénszenzor-technológiák és kalibrálhatóságuk

A hidrogén detektálására többféle érzékelő-elv áll rendelkezésre. Ezek közül az ipari automatizálásban legelterjedtebbek a katalitikus, az elektrokémiai, a félvezető (MOX), a termikus vezetőképességű (TCD), valamint a palládium-alapú és optikai szenzorok. Ezen technológiák mindegyike eltérően viselkedik a kalibrálás és a hosszú távú stabilitás szempontjából.

Katalitikus (pelliszor) szenzorok:

A katalitikus égésselvű érzékelők a legrégebbi és legelterjedtebb technológiát képviselik. Működésük alapja, hogy a hidrogén katalizátor jelenlétében elég, és a felszabaduló hő megváltoztatja a szenzor ellenállását. Előnyök: robusztus, széles mérési tartomány, gyors reakció. Hátrányok: oxigénigény, keresztérzékenység más éghető gázokra, mérgező anyagok (sziloxánok, kénvegyületek) okozta érzékenység-csökkenés [3][9]. Kalibrálhatóság: rendszeres nullpont- és span-kalibrálást igényel, tipikusan 50% LEL hidrogén keverékkel. Az ipari gyakorlatban félévente kötelező újrakalibrálni, és gyakori a napi funkcióellenőrzés is (bump teszt) [9][10].

Elektrokémiai szenzorok:

Az elektrokémiai cellák a hidrogén oxidációját/redukcióját mérik, az így keletkező áram vagy feszültség arányos a koncentrációval.

Előnyök: nagy érzékenység (ppm szint), alacsony energiaigény, viszonylag jó szelektivitás.

Hátrányok: rövid élettartam (1–2 év), lassabb válaszidő (több tíz másodperc), érzékenység a környezeti feltételekre [4][6]. Kalibrálhatóság: kétpontos kalibráció (nullgáz és ismert H₂-koncentráció) jellemző, de a drift és az öregedés miatt gyakrabban, akár negyedévente is szükséges lehet [5].

Félvezető (MOX) szenzorok:

A MOX érzékelők fém-oxid réteg ellenállás-változásán alapulnak, amely hidrogén jelenlétében módosul.

Előnyök: egyszerű és olcsó technológia, széles mérési tartomány, hosszú potenciális élettartam (5–10 év).

Hátrányok: hőmérséklet- és páratartalom-érzékenység, keresztérzékenység más redukáló gázokra, magas működési hőmérséklet szükségessége [6][7].

Kalibrálhatóság: jelleggörbájük gyakran nem lineáris, ezért többpontos kalibráció szükséges. Sok MOX-modul beépített nullpont-korrekciót vagy önkalibráló algoritmust alkalmaz a drift mérséklésére [6].

Termikus vezetőképesség (TCD) szenzorok:

A TCD-k a hidrogén kiemelkedő hővezető képességét mérik, két hőellenállásos elem összehasonlításával.

Előnyök: egyszerű működési elv, stabil, jól használható magas koncentrációknál (pl. tisztaságmérés).

Hátrányok: érzékenyek a háttérgáz összetételére és a hőmérsékletre, alacsony koncentrációnál kevésbé hatékonyak [4][5].

Kalibrálhatóság: lineáris jelleggörbájük miatt könnyen kalibrálhatók null- és span-gázzal. Driftjük általában alacsony, fő kihívás a környezeti feltételek kompenzálása [3].

Palládium-alapú és optikai szenzorok:

A palládium alapú szenzorok a Pd réteg hidrogénabszorpcióját használják ki, amely megváltoztatja annak elektromos vagy optikai tulajdonságait.

Előnyök: magas szelektivitás hidrogénre, alacsony drift, szobahőmérsékleten is működhetnek.

Hátrányok: érzékenység bizonyos mérgező komponensekre (pl. kénvegyületek), viszonylag magas költség [5][7].

Kalibrálhatóság: lineáris jelleggörbájük miatt viszonylag egyszerű a kalibráció. Gyakran hosszabb időközönként is elegendő az ellenőrzés (évente). Az optikai szálak változatok esetében spektrális korrekcióra és hőmérséklet-kompenzációra is szükség van [11][12].

4. Kalibrálási gyakorlatok az iparban

A hidrogén környezetben alkalmazott érzékelők kalibrálása kulcsfontosságú a biztonság és a folyamatirányítás szempontjából. A kalibrálás célja, hogy a szenzor kimenete megfeleljen egy nyomon követhető etalon által szolgáltatott értékeknek [1]. Ipari környezetben az etalon rendszerint palackozott gázkeverék, amely adott koncentrációjú hidrogént tartalmaz levegőben vagy nitrogénben [9]. Ezeket akkreditált laborok állítják elő és tanúsítják, biztosítva a stabilitást és a visszavezethetőséget.

A gyártói ajánlások szerint a hidrogénérzékelőket félévente–évente célszerű újrakalibrálni [9]. Kritikus környezetben (pl. robbanásveszélyes terek) gyakran napi funkcióellenőrzést is előírnak. A bump teszt segít kimutatni a driftet, az érzékenység csökkenését vagy a katalizátor mérgezését, még mielőtt az veszélyes hibát okozna [10].

5. Kalibrációs megoldások és trendek

Az iparban egyre nagyobb hangsúlyt kap a helyszíni (in-situ), nem invazív kalibrálás, amely lehetővé teszi a mérőfej leszerelése nélküli beállítást [12]. Emellett terjednek az intelligens szenzorok, amelyek digitálisan tárolják a kalibrációs adatokat, automatikus nullpont-ellenőrzést végeznek, vagy előre jelzik a kalibráció szükségességét [11]. A legújabb fejlesztések között megjelentek az olyan hidrogénszenzorok, amelyek „önkalibrálóknak” tekinthetők: nincs bennük fogyó elem, driftjük elhanyagolható, így csak hosszabb időközönként kell ellenőrizni őket [11][12].

6. Összegzés

A hidrogén ipari alkalmazásokban a szenzorok kalibrálhatósága meghatározó tényező a biztonság, a folyamatirányítás pontossága és a szabványoknak való megfelelés szempontjából [1][2]. A szakirodalom áttekintése alapján a legfontosabb metrológiai szempontok közé tartozik a mérési tartomány, a detektálási határ, a pontosság, az ismétlíképesség, a hosszú távú stabilitás és drift, valamint a gyors válaszidő és a megfelelő szelektivitás [3][4][6].

A különböző szenzortípusok eltérő előnyökkel és korlátokkal rendelkeznek:

- a katalitikus érzékelők beváltak a robbanásveszély jelzésére, de gyakori kalibrációt igényelnek [9][10];
- az elektrokémiai cellák érzékenyek és szelektívek, de élettartamuk rövid és driftjük jelentős lehet [5];
- a félvezető (MOX) szenzorok olcsók és tartósak, ugyanakkor keresztérzékenyek és környezeti hatásokra érzékenyek [6][7];
- a TCD érzékelők stabilak és lineárisak, de főként magas koncentrációknál alkalmazhatók [4][5];
- a palládium-alapú és optikai érzékelők kiemelkedően szelektívek és stabilak, de magasabb költségük korlátozhatja alkalmazásukat [11][12].

Az ipari gyakorlatban a rendszeres, dokumentált kalibráció elengedhetetlen: félévente vagy évente újrakalibrálás, valamint a napi funkcióellenőrzés kritikus környezetekben alapkövetelmény [9][10]. A szabványok (pl. ISO 26142, EN 60079-29-1) és a tanúsítási rendszerek (ATEX/IECEx) biztosítják, hogy a hidrogénérzékelők megfeleljenek a metrológiai és biztonsági elvárásoknak [2][8].

Összességében az optimális szenzorválasztás olyan metrológiai profilt és üzemeltetési ökoszisztémát igényel, amely:

- minimalizálja a driftet,
- garantálja a gyors és szelektív választ,
- támogatja a rendszeres, nyomon követhető kalibrálást.
- Ezáltal a hidrogénes technológiák ipari alkalmazásai biztonságosabbá, megbízhatóbbá és szabványoknak megfelelővé válnak, hozzájárulva a hidrogén alapú gazdaság hosszú távú fejlődéséhez [6][7].

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

HIVATKOZÁSOK:

- Nemzeti Akkreditáló Hatóság. (2020). *Metrológiai fogalomtár: Kalibrálás és hitelesítés definíciói*. Retrieved from <https://www.nah.gov.hu>
- International Organization for Standardization. (2010). *ISO 26142:2010 Hydrogen detection apparatus – Stationary applications*. ISO. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/51954.html>
- National Renewable Energy Laboratory. (2011). *Hydrogen sensor workshop summary report*. U.S. Department of Energy. Retrieved from <https://www.nrel.gov/docs/fy11osti/52088.pdf>
- Züttel, A. (2020). Hydrogen sensors – A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319920308192>
- Korotcenkov, G. (2014). *Handbook of gas sensor materials: Hydrogen sensors*. SpringerOpen. Retrieved from <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4614-7165-3>
- Zhang, L., Sun, Y., Guo, Y., Yang, T., & Liu, F. (2019). Recent advances in hydrogen sensor technology for industrial applications. *Sensors*, 19(21), 4567. <https://doi.org/10.3390/s19214567>
- Raman, V., & Kühn, K. (2020). Hydrogen safety and sensor calibration challenges. *Energies*, 13(20), 5455. <https://doi.org/10.3390/en13205455>
- European Committee for Standardization. (2016). *EN 60079-29-1: Explosive atmospheres – Part 29-1: Gas detectors – Performance requirements of detectors for flammable gases*. Retrieved from <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/7b4d9dd0-f8ee-4939-855d-4d013b1e8ab0/en-60079-29-1-2016>

Air Products. (2021). *Calibration gases – Ensuring accuracy in gas detection*. Retrieved from <https://www.airproducts.co.uk/gases/calibration-gases>

Senselektro Kft. (2022). *Gázérzékelők kalibrálása és karbantartása*. Retrieved from <https://www.senselektro.hu>

Roth, C., Müller, T., Kraus, F., & Schütze, A. (2021). Self-calibrating hydrogen sensors for industrial safety applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 346, 130501. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130501>

Dynamic Ratings. (2020). *Hydrogen sensors for dissolved gas analysis in transformers*. Retrieved from <https://www.dynamicratings.com/hydrogen-sensor/>

Definition of measurement capability and its metrological significance in a calibration environment.

Hussam Rostum

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc ;
hussam.rostum@uni-miskolc.hu

Abstract

Measurement capability represents a fundamental element of the metrological calibration framework, as it reflects the ability of a laboratory or measurement system to perform reliable measurements within defined limits of accuracy and uncertainty. This paper aims to establish a comprehensive theoretical understanding of measurement capability and its practical significance in industrial and research calibration environments. Core conceptual principles including accuracy, linearity, hysteresis, and uncertainty are examined alongside the influence of environmental and procedural factors on measurement quality. The discussion also highlights the essential role of compliance with international standards, such as ISO 17025, in strengthening measurement traceability and ensuring the credibility of results. Through this analytical perspective, the study demonstrates that measurement capability is not merely a performance indicator, but a metrological pillar for establishing confidence in measurement, supporting informed decision-making, and enabling harmonization of measurement results across global contexts

• *Keywords: measurement capability, calibration, metrology, accuracy, measurement uncertainty, ISO 17025, traceability, linearity, hysteresis, reliability of measurement, measurement standards, laboratory accreditation*

1. Introduction

Reliable measurement is one of the foundational pillars of modern science, engineering, and industrial quality assurance. Every technological process, from manufacturing precision components to monitoring environmental conditions depends upon the ability to quantify physical parameters with confidence and consistency. Within this context, *measurement capability* emerges as a critical determinant of the reliability and credibility of any measurement process. It defines not only the capacity of a system to produce accurate and repeatable results, but also the boundaries of what can be statistically validated within a known level of measurement uncertainty.

Calibration laboratories, whether industrial or academic, play a central role in maintaining the integrity of measurement systems. Their responsibility extends beyond performing calibrated measurements; they must demonstrate competence, traceability, adherence to international standards, and rigorous control of uncertainty sources. The evolution of global trade, regulatory standards, and cross-border technological collaboration has intensified the requirement for universally recognized metrological practices particularly those governed by frameworks such as ISO 17025 [1].

A thorough examination of measurement capability therefore requires an understanding of its conceptual foundations including accuracy, linearity, hysteresis, stability, and uncertainty as well as its practical implementation in real calibration environments. This includes the proactive management of environmental conditions, instrument behavior, and systematic versus random error contributions.

This paper aims to explore measurement capability not simply as an abstract concept, but as a functional performance parameter that influences laboratory accreditation, decision-making reliability, and the international harmonization of measurement data. By bridging theoretical understanding with practical implementation, this study contributes to a clearer comprehension of how measurement capability shapes the credibility and comparability of results across scientific and industrial domains.

2. Theoretical Framework

A meaningful analysis of measurement capability must be rooted in a precise understanding of the core metrological parameters that define the behavior, performance, and reliability of measurement systems. At the heart of this framework lie several key concepts: accuracy, precision, linearity, hysteresis, repeatability, and measurement uncertainty, each of which contributes uniquely to the evaluation and interpretation of measurement results [2].

Accuracy reflects the closeness of agreement between a measured value and a reference value accepted as true. It is influenced by systematic deviations arising from calibration errors, environmental conditions, and inherent biases in the measurement instrument. While accuracy is often perceived as the most intuitive indicator of measurement quality, it cannot stand alone without careful consideration of repeatability and uncertainty.

Precision, in contrast, characterizes the consistency of repeated measurements under identical conditions. A system may demonstrate high precision even in the presence of systematic bias, highlighting the fundamental distinction between the stability of measurement output and its actual validity relative to the reference standard.

Linearity describes the extent to which the measurement system maintains proportionality between input stimulus and output signal across the instrument's operating range. Deviations from linearity introduce scale-dependent distortions that can erode measurement capability, particularly in instruments employed over wide dynamic ranges.

Hysteresis refers to the discrepancy in measurement output depending on whether the input variable is increasing or decreasing. This often results from mechanical or material-based internal instrument characteristics and introduces direction-dependent distortions that must be accounted for in calibration and reporting processes.

Repeatability and reproducibility broaden the scope of measurement performance evaluation. Repeatability concerns measurement consistency within one instrument under controlled conditions, while reproducibility extends the concept across instruments, operators, and facilities. These parameters are particularly important in inter-laboratory comparisons and collaborative testing programs.

Perhaps the most central element of the theoretical framework is **measurement uncertainty**, which provides a quantitative expression of the degree of doubt associated with a measurement result. Rather than representing an imperfection, uncertainty is recognized as a foundational element of scientific rigor. When framed within the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), uncertainty analysis facilitates structured evaluation of contributing error sources, including both random fluctuations and systematic influences.

Together, these metrological principles establish the conceptual foundation for understanding measurement capability as a multidimensional construct, governed not by a single parameter but by a constellation of performance indicators. Their systematic integration enables laboratories to evaluate the validity of measurement outputs, define performance thresholds, and ensure compliance with internationally recognized standards [1,2].

3. Theoretical Framework

Measurement uncertainty constitutes one of the most fundamental and indispensable pillars of metrology. Unlike accuracy, which provides a single-point indicator of correctness, uncertainty offers a quantified range within which the true value of the measured parameter is believed to lie. In modern scientific and industrial contexts, the reporting of measurement results without an accompanying statement is considered incomplete, and in many domains, unacceptable. The Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) provides the standardized methodological approach for uncertainty evaluation, classifying uncertainty contributions into two main categories: **Type A** and **Type B**.

Type A uncertainty is derived through statistical analysis of repeated measurements and reflects randomness inherent to the measurement process.

Type B uncertainty incorporates non-statistical information including calibration certificates, manufacturer specifications, environmental influences, and expert judgment.

The computation of combined measurement uncertainty involves a structured aggregation of these components, often using root-sum-of-squares propagation methods. This enables the transformation of disparate uncertainty sources into a coherent and homogeneous expression that relates directly to the measurement result.

Uncertainty serves multiple roles in the calibration environment. First, it provides transparency regarding the confidence level associated with the measurement, enabling informed decision-making for engineers, manufacturers, and regulatory bodies. For example [3], a tolerance engineering part cannot be validated as compliant unless the uncertainty associated with its dimensional verification is sufficiently small relative to the tolerance band. Second, uncertainty enables comparability between laboratories and across international borders. A measurement performed in one accredited facility must be meaningfully comparable to a measurement made elsewhere — a requirement that underpins global metrological traceability. The uncertainty budget functions as the mathematical and conceptual tool that allows these comparisons to be standardized and harmonized. Third, uncertainty supports the accreditation process for calibration laboratories. Organizations operating under frameworks such as ISO 17025 are obliged to demonstrate not only technical competence, but also methodological consistency in uncertainty evaluation and expression. This ensures that measurement results can be trusted by third parties, regulatory authorities, and industrial stakeholders. Finally, uncertainty plays a role in continuous performance improvement within the laboratory. Each component of the uncertainty budget corresponds to a potential source of measurement error — and therefore a potential target for optimization. Reduced instrument drift, improved temperature stabilization, enhanced operator training, and refined calibration intervals all contribute to uncertainty reduction, thereby increasing measurement capability. In summary, uncertainty is not an undesirable weakness in the measurement system; rather, it is the formal acknowledgement of the inherent limitations of measurement, expressed in a mathematically sophisticated and internationally standardized manner. It is through the disciplined evaluation of uncertainty that calibration laboratories establish both internal quality assurance and external credibility.

4. Practical Calibration Environment

The translation of theoretical metrological principles into real-world measurement capability occurs within the operational environment of the calibration laboratory. While measurement theory defines the conceptual boundaries of capability, it is the practical calibration context that determines how effectively these principles are executed and sustained [4]. A

critical factor influencing measurement capability is **environmental control**. Variations in temperature, humidity, vibration, electromagnetic interference, and atmospheric pressure can introduce subtle deviations in instrument performance. For instance, thermal drift may alter sensor output or dimensional measurements, while humidity-induced charge dissipation can affect electronic precision instruments. Consequently, competent calibration facilities implement stringent environmental conditioning including climate-controlled rooms, vibration-isolated workspaces, and shielding from electrical noise accompanied by continuous monitoring and documentation. **Instrument condition and maintenance** form another essential aspect. Calibration instruments, reference standards, and measurement devices must themselves exhibit long-term stability and traceability. Reference standards whether mass blocks, voltage references, or gauge blocks require periodic recalibration against national or international standards to maintain alignment with the metrological hierarchy. Instrument drift, component fatigue, and material aging are mitigated through scheduled verification, preventive replacement strategies, and historical performance tracking. **Human factors** also significantly affect measurement capability. Even the most advanced instrumentation is susceptible to operator-induced variability. Handling techniques, alignment methods, procedural interpretation, and measurement recording practices can introduce variation. For this reason, accredited laboratories emphasize operator training, procedural standardization, and competency assessment. The use of written calibration protocols and detailed procedural documentation supports measurement reproducibility and reduces subjectivity. Another key dimension of the calibration environment is **measurement traceability**, which ensures that each measurement can be connected through an unbroken chain of calibrations to recognized national or international standards (e.g., SI units). Traceability provides not only legal and regulatory assurance, but also scientific validity and interoperability of measurement results. A measurement with unknown or unverifiable traceability cannot support a meaningful uncertainty statement and therefore cannot be reliably used in critical decision-making. **Documentation and quality management** play a central role as well. Calibration records, uncertainty budgets, environmental logs, and instrument histories create a transparent measurement narrative. Under ISO 17025 requirements, laboratories must demonstrate not only that accurate measurements are performed, but that they are verifiably consistent, repeatable, and properly recorded. This ensures that measurement results are defensible in audits, technical disputes, or regulatory reviews. Finally, the increasing integration of **automation and digital calibration systems** is reshaping practical calibration environments. Automated platforms reduce human error, enhance repeatability, and enable high-resolution measurement sampling. However, automation also introduces new challenges such as algorithmic bias and digital drift which must be incorporated into uncertainty analysis and calibration procedures. In sum, the practical calibration environment is the operational domain where theoretical metrology intersects with real-world constraints. The quality and reliability of measurement capability depend on rigorous control of environmental conditions, instrumental behavior, operator performance, traceability infrastructure, and quality documentation all functioning within a standardized and auditable framework.

5. Metrological Importance of Measurement Capability

Measurement capability is not merely a technical attribute, it represents a cornerstone of scientific integrity, industrial reliability, and international harmonization. Its significance extends far beyond laboratory practice and influences broader domains of technological development, commerce, safety regulation, and scientific discovery. At the most fundamental level, measurement capability enables **confidence in measurement results**. When measurements are accompanied by clearly defined accuracy, traceability, and quantified uncertainty, stakeholders can rely on the data to make informed technical and strategic decisions. Whether determining the compliance of manufactured components, ensuring the

precision of medical instrumentation, or validating claims in scientific research, high measurement capability supports trustworthy conclusions. In industrial contexts, measurement capability plays a central role in **quality control and conformance assessment**. Manufacturing tolerances, component specifications, and performance standards require precise measurements to validate product integrity. Without reliable measurement capability, the risk of failures ranging from minor quality deviations to catastrophic engineering errors increases significantly. Thus, robust measurement capability directly contributes to operational safety, cost reduction, and technological competitiveness. On the regulatory and legal front, measurement capability underlies **standards enforcement and accreditation frameworks**. Organizations such as ISO, OIML, and national metrology institutes depend on measurement capability evidence to certify laboratory competence and regulatory compliance. ISO 17025 specifically mandates that calibration laboratories demonstrate measurement capability as part of the accreditation process, linking technical performance with legal recognition and organizational credibility. From a scientific perspective, measurement capability facilitates **data comparability and reproducibility**, two essential pillars of the scientific method. The reliability of experimental conclusions depends on the ability of independent laboratories to replicate results within known uncertainty boundaries. Without consistent measurement capability, experimental findings risk being non-reproducible or scientifically ambiguous. Measurement capability also supports **economic and technological globalization**. In international trade, components manufactured in one country must meet measurement-based conformity specifications validated abroad. For example, a precision aerospace component measured in Hungary must be verifiably equivalent in measurement terms to inspection performed in Germany or Japan. Without common measurement capability frameworks, such interoperability would collapse, leading to economic inefficiencies and technical isolation[5].

Furthermore, measurement capability encourages **continuous improvement and innovation within metrology**. By making uncertainty sources transparent, it incentivizes technical enhancements such as improved sensor stability, better environmental control, and more advanced calibration techniques. High measurement capability thus functions as both a quality indicator and a driver of technological progress. Ultimately, the metrological importance of measurement capability lies in its role as a unifying language of measurement integrity. It transforms raw instrument readings into credible, traceable, and scientifically defensible results. As industries become increasingly data-driven and quality-focused, the demand for verifiable, high-capability measurement systems will only grow, making measurement capability an enduring foundation of modern technological society.

6. Conclusion

Measurement capability stands as a central principle of metrology, underpinning the reliability, comparability, and scientific validity of measurement results across industrial and research domains. Through this analysis, it is evident that measurement capability is not defined by a single parameter, but by an integrated network of metrological concepts — including accuracy, linearity, hysteresis, and uncertainty — supported by rigorous calibration methodologies and environmental controls.

A key outcome of this investigation is the recognition that uncertainty is not a limitation, but a formal expression of measurement transparency. By quantifying sources of variation and establishing statistical confidence, uncertainty enables informed judgment and robust decision-making. Likewise, the practical calibration environment emphasizes that measurement capability depends equally on technical instrumentation, operator competence, environmental stability, and procedural discipline.

As global technical systems become increasingly interconnected, the need for reliable, traceable, internationally harmonized measurements continues to grow. Measurement capability thus becomes not only a technical requirement for laboratory accreditation, but also a foundational component of global scientific collaboration, regulatory enforcement, and industrial competitiveness.

Looking forward, advancements in automated calibration, smart sensing technology, AI-assisted uncertainty estimation, and digital traceability promise to further enhance measurement capability. Continued investment in metrological research, workforce competency, and international standardization will ensure that measurement capability remains a resilient and evolving foundation of modern technological progress.

REFERENCES

- [1] Ikumapayi, Omolayo M., et al. "A Salient review on Calibration Techniques and Standards in Metrology." *2024 IEEE 5th International Conference on Electro-Computing Technologies for Humanity (NIGERCON)*. IEEE, 2024.
- [2] Brown, Richard JC. "Development of the global measurement system and its ongoing importance for accurate and effective air quality measurements." *Environmental Science: Processes & Impacts* 27.2 (2025): 289-296.
- [3] Razumić, Andrej, et al. "A review of methods for assessing the quality of measurement systems and results." *Applied Sciences* 15.17 (2025): 9393.
- [4] Langsdale, Mary, et al. "The challenges and limitations of validating satellite-derived datasets using independent measurements: lessons learned from essential climate variables." *Surveys in Geophysics* (2025): 1-38.
- [5] do Rosario, Pedro Paulo Novellino, and Alexandre Mendes. "Metrology and Measurement Uncertainty: Concepts and Applications." (2025).

IMPLEMENTATION AND COMMISSIONING OF AN ATEX-CERTIFIED HYDROGEN MEASUREMENT SYSTEM FOR MEASURING NATURAL GAS-HYDROGEN MIXTURES AND LONG-TERM TESTING OF MEASURING DEVICES

Hussam Rostum

Center for Advanced Materials and Intelligent Technologies in Higher Education and Industrial Collaboration, University of Miskolc;
hussam.rostum@uni-miskolc.hu

Abstract

The incorporation of hydrogen into natural gas transmission systems is becoming increasingly important in the decarbonization of energy sources, but it also poses new challenges in terms of measurement and safety. Due to the low molecular weight, high diffusivity and wide ignition range of hydrogen, reliable concentration measurement is essential for both hydrogen injection processes and long-term behavior of natural gas-hydrogen mixtures. This paper presents the design and commissioning of an ATEX-certified hydrogen measurement system, which was specifically developed for test measurements in natural gas transmission infrastructure and for long-term hydrogen exposure testing of measuring instruments. The system is based on electrochemical and thermal conductivity sensors from the Orbisphere 31xxx/366x series, including intrinsically safe electronics, a robust IP-protected housing, and a multi-valve hydraulic design supporting calibration and sampling. The article describes in detail the electrical and data communication parameters of the instrument, the cabling requirements for safe and hazardous areas, and the entire commissioning process from mechanical installation to calibration with authentic gas mixtures. The results demonstrate that the configured measurement system is suitable for accurate and stable hydrogen content monitoring of natural gas–hydrogen mixtures, supporting the long-term instrumental testing required for network hydrogen integration.

Keywords: hydrogen–natural gas mixture; hydrogen detection; ATEX certification; long-term testing of measuring instruments

1. Introduction

The blending of hydrogen into natural gas is becoming increasingly important in the European and Hungarian energy transition efforts. However, the properties of natural gas-hydrogen mixtures and the long-term behavior of the pipeline network and measuring devices against hydrogen can only be investigated with precise and reliable measurement systems.

The fundamental challenges of hydrogen measurement are:

- high diffusivity,
- low molecular weight,
- wide ignition range (4–75 V/V%),
- low ignition energy,

- rapid changes in the composition of gas mixtures.

For these reasons, an ATEX-certified, long-term stable and fast response hydrogen sensor is required for tests in real-life natural gas-hydrogen systems.

This study documents the commissioning of a measurement system that provides reliable measurement data for long-term studies.

2. Technical and scientific background of hydrogen measurement

There are several principles that can be used to measure hydrogen concentration. Orbisphere systems use two main technologies:

2.1. Thermal conductivity sensors (TC)

Due to the high thermal conductivity of hydrogen, changes in the gas composition strongly influence the heat dissipation of the sensor heating element. This change is reflected in an electrical signal level that is proportional to the hydrogen concentration. According to the manufacturer's data, TC sensors are typically applicable in the range of 0–20 ppm or up to several bars of partial pressure, their temperature range is 0–50 °C, and their cycle time is approximately 17 s.

2.2. Electrochemical hydrogen sensors (EC)

EC sensors measure hydrogen diffusing through a semipermeable membrane, which causes an electrochemical current change at the electrodes. The membrane material (PFA, ETFE, Tedlar, Saran) determines the sensitivity and response time. The 31xxx series sensors can operate with a response time of 2–6 s and can be used up to 200 bar.

2.3. The role of the Orbisphere 366x analyzer

The 3660EX and 3662EX analyzers process the signals of the hydrogen sensor, certified for ATEX zones.

The 3660EX can operate in the “safe area”, while the sensor is located in the explosive area, while the 3662EX can be placed entirely in zone 1 environments.

Key features of the 366x devices include:

- analog 4–20 mA output
- alarm relay output (3660EX)
- RS-232/RS-485 communication
- built-in software for calibration and configuration
- safety design compliant with zone classification

Integrating a hydrogen measurement system therefore requires electrical, hydraulic and safety compliance, as well as precise commissioning.

3. Structure of the measuring system

Main elements of the hydrogen measuring system:

- Hydrogen sensor (31xxx EC or 312xx TC)
- 3662EX analyzer – can be installed in hazardous areas
- Intrinsically safe power supply / isolation module (BXNE or MTLx523)
- Hydraulic sampling circuit
- Data acquisition (4–20 mA, RS-485)

Hydrogen measurement is a particularly sensitive operation in hazardous environments. The 366x instrument family complies with the following certifications:



Figure 1 Overview image of the installed hydrogen measurement system

4. Instrument Technical Specifications

The system has an IP65/NEMA4 stainless steel enclosure, an operating range of 0–45 °C, and is compatible with both dissolved and gaseous hydrogen measurements. The 4–20 mA output allows for direct integration into SCADA or process control systems.

Tables 1 Technical specifications of the 3660EX / 3662EX analyzer

Technical Parameter	Detailed Specification
Intrinsic safety certification, 3660EX	LCIE 03 ATEX 6354 X II (1) G Ex [ia Ga] IIC T6 Ga
Flameproof certification, 3662EX	LCIE 03 ATEX 6004 X II 1 G Ex ia IIC T4 Ga
Power supply requirements, 3660EX	95–130 V AC, 50/60 Hz; 207–253 V AC, 50/60 Hz
Power supply requirements, 3662EX	6.5–13.5 V DC, 50 mA max current consumption; supplied via IS barrier
Power consumption, 3660EX	20 VA
Power consumption, 3662EX	0.8 W
Serial output, 3660EX (safe area)	RS-232 or RS-485; baud rate: 9600; stop bit: 1; start bit: 0; parity: none
Serial output, 3662EX (safe area)	RS-485; baud rate: 9600; stop bit: 1; start bit: 0; parity: none

Technical Parameter	Detailed Specification
Analog output, safe area (3660EX only)	0–20 mA or 4–20 mA, non-isolated, $R_{max} = 500 \Omega$
Analog output, hazardous area (3660EX)	0–20 mA or 4–20 mA, non-isolated, $R_{max} = 350 \Omega$, short-circuit limit 150 mA
Analog output, hazardous area (3662EX)	0–20 mA or 4–20 mA, non-isolated, $R_{max} = 100 \Omega$, short-circuit limit 212 mA
Voltage output, hazardous area (3662EX only)	0–2 V, non-isolated, $R_{min} = 100 k\Omega$
Alarm relays (3660EX only)	High-voltage relays, NO and NC contacts; Rating: 2 A; Voltage: 125 V; Power: 50 W/50 VA; Hysteresis: adjustable
Relay system	NO and NC contacts, rating: 2 A; Voltage: 125 V; Power: 50 W/50 VA
Operating temperature range	0–45 °C
Dimensions (W × H × D)	200 mm × 200 mm × 90 mm
Weight	2.5 kg
Enclosure protection class	IP 65 / NEMA 4, full stainless-steel housing

5. Safety and ATEX requirements

Hydrogen measurement is a particularly sensitive operation in hazardous environments. The 366x instrument family complies with the following certifications:

- Classification II 1 G Ex ia IIC T4/T6 Ga
- IEC/EN 60079-0 and 60079-11 standards
- CE and EMC compliance

Tables 2 Safe-area analog and alarm output cable requirements

Parameter	Specification
Outer diameter	$\geq 4 \text{ mm}; \leq 6 \text{ mm}$
Conductor cross-section	0.14–0.25 mm ² (26–24 AWG)
Insulation	PVC
Nominal voltage	250 V
Absolute max voltage	1200 V
Max current rating	1.5–2.5 A
Cable resistance	70–140 Ω/km
Capacitance at 800 Hz	conductor: 100 pF/m; sheath: 240 pF/m

The manufacturer emphasizes that:

- the device may only be installed by a qualified technician,
- the cable shielding between the sensor and the analyzer is mandatory,
- an intrinsically safe (IS) power supply unit must be installed in the circuit, such as a Georgin BXNE or MTLx523 series unit
- Georgin power supply module BXN

Tables 3 Hazardous-area analog data and RS-485 cable requirements

Parameter	Specification
Maximum cable length	1000 m
Number of conductors	2 (twisted pair for RS-485)
Outer diameter	Max. 6.5 mm
Conductor cross-section	$\geq 0.5 \text{ mm}^2$ (20 AWG)
Insulation	PVC
Nominal voltage	250 V
Absolute max voltage	1200 V
Max current rating	6 A
Cable resistance	$\leq 39 \Omega/\text{km}$
Capacitance at 800 Hz	conductor: $\leq 150 \text{ pF/m}$; sheath: $\leq 290 \text{ pF/m}$

The conditions for safe operation are:

- proper insulation of cables,
- precise design of the grounding point,
- mechanical protection of the membrane and sensor,
- electrical isolation.

Tables 4 Power cable specifications

Parameter	Specification
Number of conductors	3-wire cable (live, neutral, earth)
Outer diameter	$\geq 6 \text{ mm}$; $\leq 10.5 \text{ mm}$
Conductor cross-section	$\geq 1 \text{ mm}^2$ (AWG18) to $\leq 2.5 \text{ mm}^2$ (AWG14)

6. Structure of the hydrogen measuring system

According to the uploaded project documentation, the hydrogen meter consists of the following units:

- Hydrogen sensor (31xxx EC or 312xx TC)
- Orbisphere 3662EX analyzer (with installation in a hazardous area)
- Safety power module / isolation unit - e.g. MTLx523 or BXNE
- Hydraulic piping system with 4 two-way valves
- Sampling circuit connected to the permeability measuring cell
- 4–20 mA output for data acquisition and SCADA system

According to the schemes provided in the project, the hydraulic connection allows for a change in the direction of the calibration gas, so that the sensor and the dead space of the pipeline can be flushed before calibration

The 366x series is capable of measuring a variety of gases, including hydrogen.

Tables 5 Supported gas types and measurement units (366x EX series)

Model	Gas	Phase	Measurement units
366x EX / 1xx	O ₂ *	Dissolved	ppb/ppm; ppm; mg/L

Model	Gas	Phase	Measurement units
	O ₂ *	Gas phase	Pa/kPa; mbar/bar; %; % saturation; ppm/%
366x EX / 2xx	H ₂	Dissolved	ppb/ppm; cc/kg
	H ₂	Gas phase	Pa/kPa; mbar/bar; %
366x EX / 3xx	O ₃	Dissolved	ppb/ppm; ppm

7. Instrument Installation

Main installation steps:

- Connecting the sample gas – to the natural gas-hydrogen mixture sampling point.
- Building the hydraulic system – creating valve positions for measurement and calibration.
- Mounting the analyzer on a wall or in a rack
- Connecting the IS power supply
- Connecting 4–20 mA and RS-485

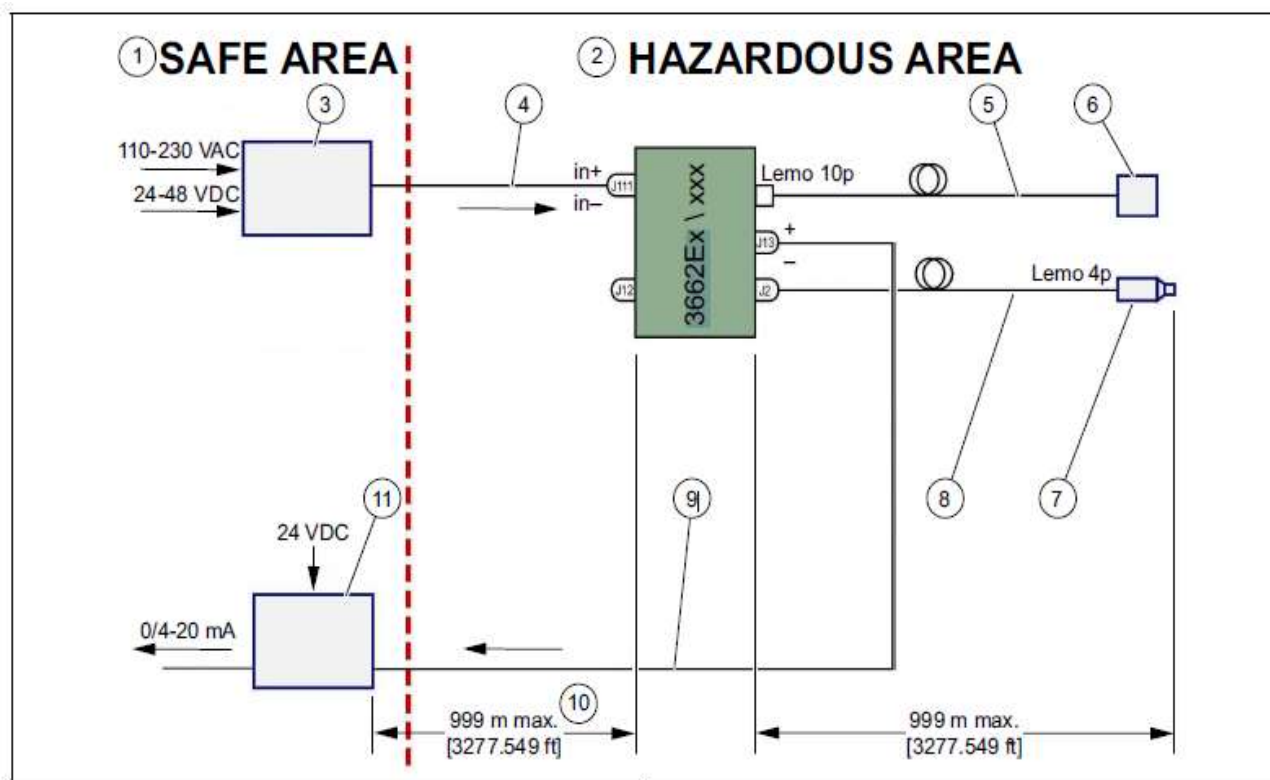


Figure 2 Hydrogen sensor wiring

Where,

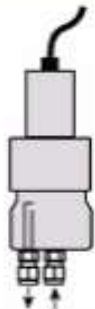
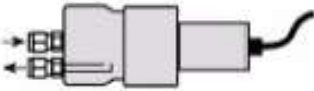
1. Safe Area
Zone classified as non-hazardous, suitable for installing standard electrical equipment, including power supplies and signal processing units.
2. Hazardous Area

Zone classified as potentially explosive (hazardous), where ATEX-certified equipment must be installed, including the 3662EX gas analyzer and the associated sensor head.

3. **Safety Barrier / Power Supply Module**
Device providing intrinsically safe (IS) electrical isolation between the safe area and the hazardous area. Models supported: 32596.B (230 VAC), 32956.A110–230 VAC, 32956.C (24–48 VDC)
4. **Power Supply Shielded Cable**
Shielded supply cable used to connect the safety barrier to the analyzer, ensuring electrical isolation and noise immunity.
5. **Sensor Cable (Type 32 515E.mm), 10 conductors + shield**
Multicore, shielded cable connecting the 3662EX analyzer to the sensor head installed in the hazardous area.
6. **Sensor Head (Model 31xxxE or GA2800 ATEX)**
ATEX-certified hydrogen sensor placed within the hazardous environment, connected via Lemo 4-pin or 10-pin connectors.
7. **Optional External Pressure Sensor (Model 32 570E.wxyz)**
Accessory pressure sensor that may be included for applications requiring pressure-compensated gas measurements.
8. **Sensor Cable (Type 32 514E.mm), 4 conductors + shield**
Shielded cable used for connecting the optional external pressure sensor to the 3662EX analyzer.
9. **0/4–20 mA Shielded Output Cable (Rload max 100 Ω)**
Analog current-loop output cable transferring the measurement signal toward the safe area instrumentation. Compliant with analyzer output range: 2 V & 0–2 V voltage compliance.
10. **Maximum Cable Length (Depending on Barrier and Cable Characteristics)**
Maximum allowed cable length is 999 meters (3277.549 feet) between the safety barrier and analyzer, and between the analyzer and the sensor head, assuming cable characteristics meet the required specifications.
11. **4–20 mA Repeater Module (Model 32954)**
Optional signal repeater used to extend current-loop transmission back to the safe area instrumentation (PLC, data logger, control system).

There are two ways to install the sensor, as shown in the following figure.

Tables 6 Possible sensor installation

Sample	Orientation of flow chamber	
Gaseous or liquid media	Vertically, with connections down and sensor up - Center connection is the inlet - Outer connection is the outlet	
Gaseous media, with occasional liquid or vapor	Horizontally, to allow for drainage - Center connection (inlet) must be up - Outer connection (outlet) must be down	

8. Calibration

Certified, accredited calibration gases are required for reproducible hydrogen measurements.

Calibration procedure:

- Zero point (N_2 or H_2 -free gas)
- Sensitivity adjustment with known H_2 concentration (e.g. 2%, 5%, 10%)
- Reverse flow direction to purge dead spaces
- Check for stable signal

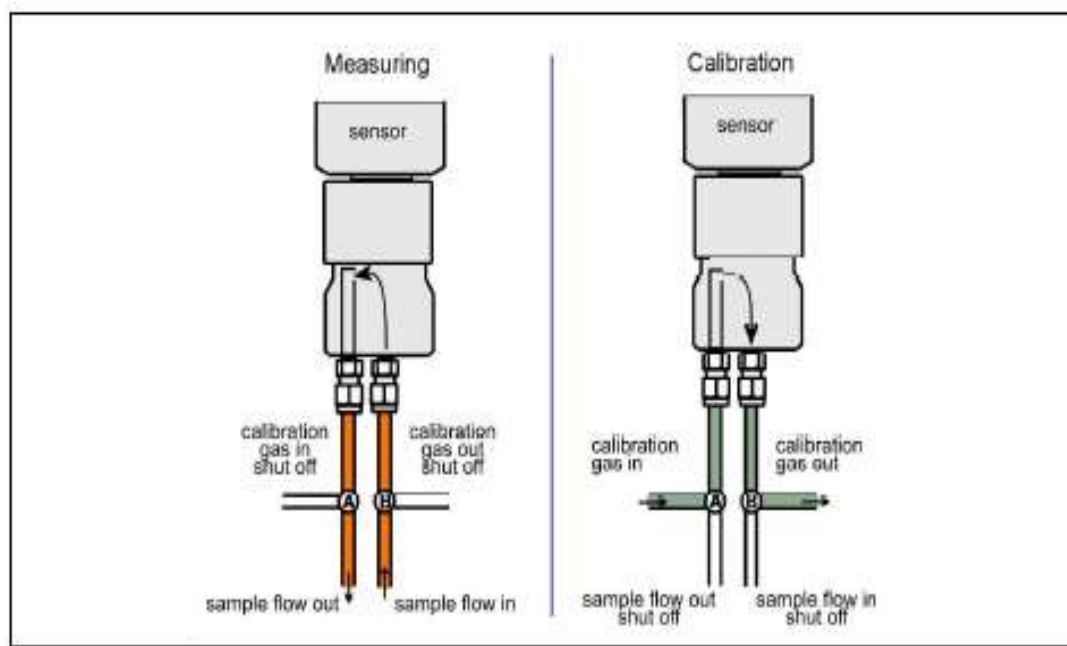


Figure 3 *Flow chamber connection*

9. Conclusions and recommendations

The ATEX-certified hydrogen measurement system is suitable for long-term testing of natural gas-hydrogen mixtures, continuous load tests of measuring devices, and accurate monitoring of different mixing ratios. Proper installation, cabling, hydraulic configuration, and regular calibration ensure stable and accurate operation even in the environment of real natural gas transmission systems.

ACKNOWLEDGMENTS

We hereby express our sincere appreciation to all those whose professional efforts contributed to the successful implementation of the project. “The project was implemented with the support of the Ministry of Energy.”

This initiative was carried out within the framework of the FLUMEN Project – Developments enabling the measurement and traceability of hydrogen in the natural gas transmission system – Phase Two, based on Grant Agreement No. VHFO/467/2023-EM_SZERZ.

REFERENCES

- [1] Hach (2020). **ORBISPHERE Model 366x ATEX – Operation Manual**. www.hach.com
(accessed: 28 September 2025).
- [2] Hach (2016). **H2 TC/EC Sensors Datasheet (DOC053.53.35026)**.
(accessed: 28 September 2025).
- [3] Hach (Edition 18). **366x ATEX – Safety, Installation and Operation Manual (DOC024.52.93000)**.
(accessed: 28 September 2025).
- [4] Hach (Edition 12). **31xxx EC Sensors – User and Maintenance Manual (DOC024.52.93016)**.
(accessed: 28 September 2025).
- [5] Georgin (2007). **BXNE 05 Intrinsically Safe Power Supply Module – Technical Datasheet**.
(accessed: 28 September 2025).
- [6] MTL/Cooper Industries. **MTL5523V/VL Solenoid/Alarm Driver – Datasheet**.
(accessed: 28 September 2025).
- [7] manuals.plus (n. d.). **Orbisphere 366x – Optimized User Manual**.
https://manuals.plus/m/1f489f1735934320297675f35485edbd9de00945729ab364b9904a981e735b5_optim.pdf
(accessed: 28 September 2025).

HIDROGÉNNEL DÚSÍTOTT METÁN VIZSGÁLATÁRA KÉSZÍTETT BERENDEZÉS

Dr. Bölkény Ildi¹, Godó László Csaba²

1 Miskolci Egyetem FIEK; ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu@uni-miskolc.hu

2 Miskolci Egyetem FIEK; laszlo.godo@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén jelentős szerepet játszik számos anyag károsodási folyamatában, különösen a fémek hidrogén okozta ridegedésében, ezért speciális laboratóriumi berendezések szükségesek a jelenség pontos vizsgálatához. A hidrogén–metán (vagy tiszta hidrogén) közeg hatása a mérőeszközökre és szelepekre ma az egyik legfontosabb vizsgálati terület a gáziparban. E jelenség pontos kvantifikálása érdekében olyan vizsgálóberendezésre van szükség, amely kontrollált körülmények között képes hidrogént bejuttatni különböző mérőeszközökbe, majd a hidrogén jelenléte által kiváltott mechanikai és mikroszerkezeti változások különböző laboratóriumi vizsgálatok során bizonyíthatóvá válnak (repedés megindulása, repedés terjedése, a repedésterjedés sebessége, hirtelen törés lehetséges fáradás) A cikk bemutatja a hidrogén földgázba keverése során különböző nyomásmérő eszközökre gyakorolt hatását. A cikk betekintést nyújt egy vizsgáló berendezés tervezésébe a felhasznált alkatrészek hidraulikus eszközök anyagának megfelelő kiválasztásába, illetve egy mérésre alkalmas konstrukció elkészítésébe. Az elkészült mérőműszerhez egy mérési metódus kifejlesztésére is szükség volt. A vizsgálathoz használt gáz 90% metánt és 10% hidrogént tartalmazott.

Keywords: keyword 1, keyword 2, keyword 3 (5–6 keywords should also be supplied)

1. Bevezetés

A Földön tapasztalható éghajlatváltozás következményei egyre intenzívebben mutatkoznak meg. Jelenlegi tudományos ismereteink alapján a hatások mérséklésének egyik lehetséges módja az üvegházhatású gázok – mindenekelőtt a szén-dioxid (CO₂) és a metán (CH₄) – kibocsátásának csökkentése, illetve lehetőség szerinti teljes megszüntetése. A CO₂-kibocsátás döntő hányada a fosszilis energiahordozók felhasználásából származik, különösen az energiatermelés és a közlekedés területén. Hosszú távú stratégiai cél a fosszilis energiaforrások kiváltása megújuló energiaforrásokkal. A teljes energetikai átállás azonban rendkívül költségigényes és időigényes folyamat, amelyet tovább nehezít, hogy jelenleg komoly technológiai kihívást jelent a megtermelt megújuló energia hatékony és nagy kapacitású tárolása.

A hagyományos energiahordozókkal való szakítás elsősorban környezetvédelmi megfontolások alapján indokolt. Az energiaipar és a közlekedés felelős a mai globális szén-dioxid kibocsátás 80-90 %-áért, az üvegház hatás kézzelfogható eredményei a globális felmelegedés, az aszályok, árvizek, hőszegrekordok, fagykárak, hurrikánok, hó- és sárlavinák, savas esők egyre gyakoribbá válnak. Az utóbbi százötven év során a Föld átlag hőmérséklete 1 °C-al emelkedett, ez már közvetlenül befolyásolja az ingatag egyensúlyokon nyugvó életterünket. A jelenség kutatói körében nincs kétség, hogy átfogó változás nélkül ez a tendencia fel fog gyorsulni, és hamarosan visszafordíthatatlanná válik. A világméretű katasztrófák óriási személyi és anyagi károkat okoznak.[1]

A szén-dioxid-kibocsátás jelentős mértékben mérsékelhető lenne, ha az energiatermelésben és a közlekedésben a földgázt és a kőolajat hidrogénnel váltanánk fel, mivel a hidrogén oxidációja során nem keletkezik szén-dioxid. A meglévő földgázszállító, elosztó és felhasználó rendszereket azonban alkalmassá kell tenni a hidrogén használatára

2. Fő hatásmechanizmusok nyomás alatti fémszerkezetekben

2.1. Hidrogén okozta ridegedés (Hydrogen Embrittlement – HE)

A hidrogén okozta ridegedés olyan anyagszerkezeti degradációs folyamat, amely során a fémrácsba diffundáló hidrogén atomos formában beépül, és kedvezőtlenül befolyásolja a fém képlékeny deformációs és törési tulajdonságait. A jelenség következtében csökken a képlékenységi és a szakítószilárdság, miközben nő a repedésindulás és repedésterjedés sebessége, ami akár hirtelen, rideg töréshez vezethet statikus terhelés, fáradás vagy túlterhelés esetén. A hidrogén a rácshibákhoz, karbidokhoz, diszlokációkhoz, szemcsehatárokhoz és mikroüreg-képződési helyekhez kötődve lokálisan gyengíti a kötéseket, illetve elősegíti a hidrogén-asszisztált repedésképződést (HEDE – Hydrogen Enhanced Decohesion) vagy a hidrogén-asszisztált lokális képlékenységet (HELP – Hydrogen Enhanced Localized Plasticity). A jelenségre különösen érzékenyek a nagy szilárdságú martenzites acélok, edzett és keményített alkatrészek, bizonyos hegesztett kötési zónák, míg az ausztenites rozsdamentes acélok és nikkelbázis ötvözetek általában jóval ellenállóbbak. Hidrogén permeáció (átdiffundálás). [2]

2.2. Hidrogén permeáció (átdiffundálás)

A hidrogén atomos formában rendkívül nagy mobilitású, ezért számos fémekben és polimerben nagyon gyors diffúziót mutat. A diffúzió sebessége a hőmérséklet mellett a külső hidrogénnyomás növekedésével is fokozódik, mivel a nyomás növeli a felületi adszorpciót és ezzel a rácsba jutó atomos hidrogén koncentrációját. Csővezetékben, tartályokban és szerkezeti elemekben mikroszkopikus szintű permeáció és szivárgás léphet fel még akkor is, ha a rendszer más gázok – például metán – esetében megfelelő tömítettséget mutatott. Ennek oka, hogy a hidrogén a legkisebb molekuláris méretű gáz, és képes olyan kapilláris hibákon, mikrorepedéseken vagy tömítési hézagokon is áthaladni, amelyeket nagyobb molekulájú gázok nem képesek átjárni. [3]

2.3. Hidrogén-indukált repedés (HIC) és feszültségkorróziós repedés (SCC)

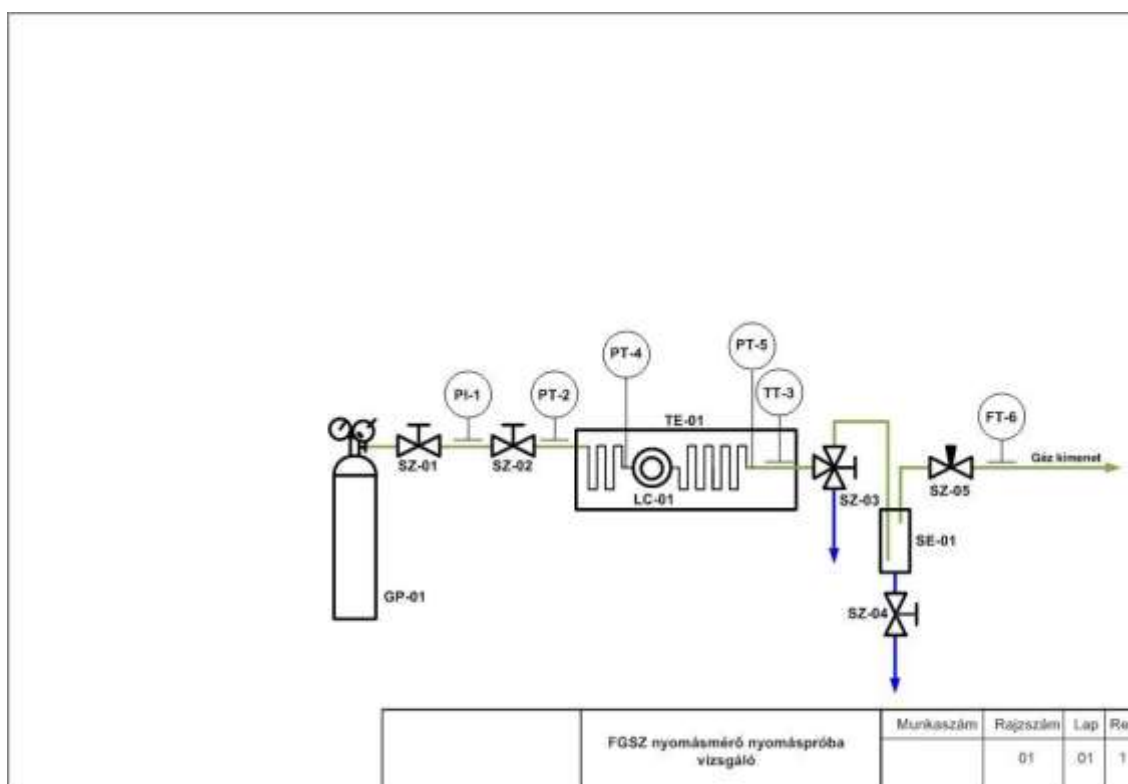
A hidrogén okozta károsodások elsősorban hegesztett szerkezetekben, illetve magas feszültségkoncentrációval terhelt alkatrészekben jelentkeznek. A diffúz hidrogén képes mikroszkopikus üregekben és diszlokációk környezetében felhalmozódni, ahol lokális nyomásnövekedést idéz elő. Ez a folyamat elősegíti a repedésindulást és -terjedést, amelyet összefoglalóan hidrogén ridegedésnek vagy hidrogén késleltetett repedésnek nevezünk. [4]

3. A berendezés tervezési, kivitelezési és gyártási folyamata

A Miskolci Egyetem Korszerű Anyagok és Intelligens Technológiák Felsőoktatási Ipari Együttműködési Központjában elkészítettünk egy hidrogén káros hatásait vizsgáló 100 bar nyomásig üzemeltethető berendezést. A berendezés termosztáttal ellátva épült meg. Az alap mérések labor hőmérsékleten 23°C(±2°C) és páratartalom (40-60%) mellett lettek elvégezve. A berendezés kialakítása a termosztát beépítése miatt lehetővé teszi az alacsonyabb hőmérsékleten elvégezhető méréseket is. Az így elérhető legkisebb hőmérséklet 0°C.

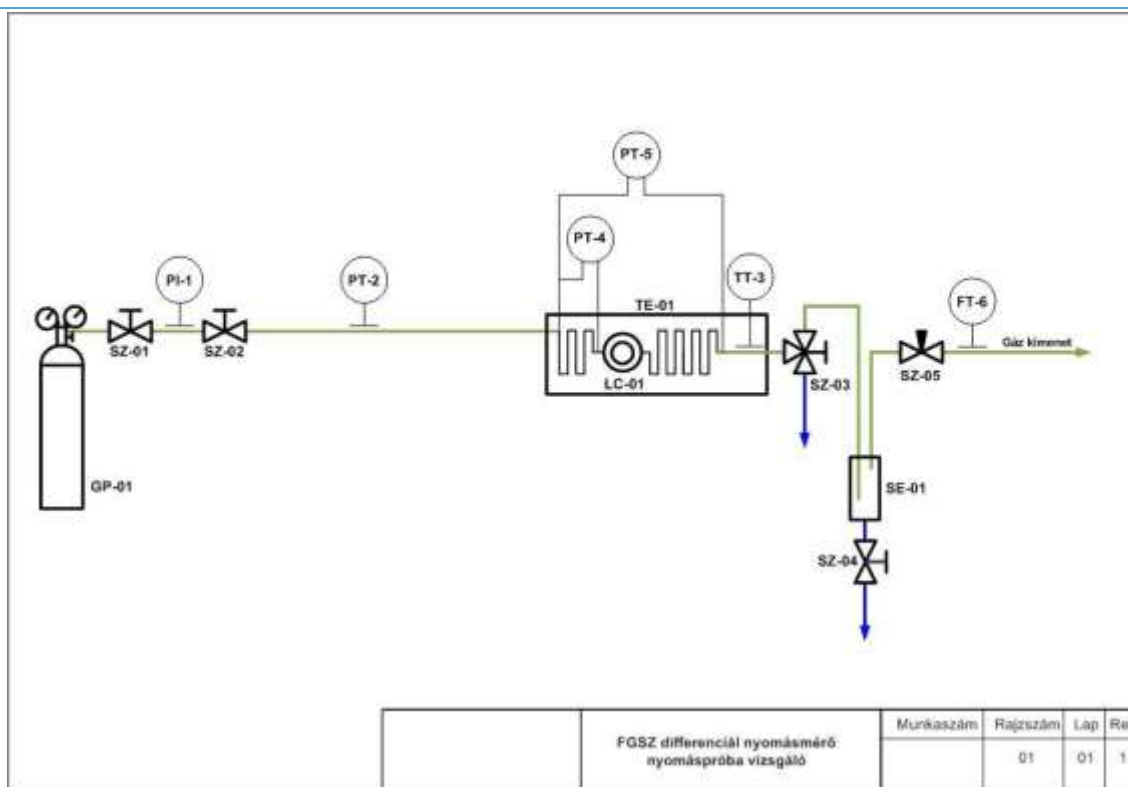
A gázáramlást biztosító gázpalack a kereskedelmi forgalomban kapható szabványos méretű és 150 bar nyomástartományú palack, űrtartalma 55 liter. A termosztát szigetelt edényben kerül elhelyezésre a mérőcső. A termosztát edény egy jól szigetelt kettős falú, rézből készült folyadéktartály. Hűtőközeg glicerin, víz, térfogata 20 liter. A felhasznált elzáró szelepek a Swagelok által gyártott SS-43S4 típusú 206 bar nyomásállóságú termékek. A csővezeték a kiépített rendszerben a teljes hidraulikus vezetékezés 6/4-es, rozsdamentes anyagból készült SS316.

A mérő készülék alkalmas hőmérő, nyomásmérő, differenciálynomásmérő, és más hidraulikus rendszerekben használatos mérőműszer vizsgálatára. A csatlakozók beiktatásával 6mm, illetve G 1/2, G 1/4 csatlakozással rendelkező egységek elemzésére.



1 ábra A nyomástávadó vizsgálatának hidraulikus rajza

Az 1. számú ábrán az elkészült mérőműszervizsgáló berendezés hidraulikus rajza látható. A TE-01 tervjelű termosztátban elhelyezett 18m hosszúságú csővezeték teszi lehetővé a hideg környezet előállítását az alacsony hőmérsékleten való méréshez. A PT-4 és PT-5 terv jelű eszközök a vizsgálandó nyomásmérők. A 2. számú ábra a differenciálynomás mérő vizsgáló berendezés hidraulikus ábráját mutatja. Ebben az esetben a tesztelt mérőeszközök a PT-4 és a PT-5 jellel vannak ellátva. Ennél a vizsgálatnál a differenciálynomásmérő úgy van a rendszerbe kötve hogy a bemenő ága a csővezeték bemeneti részéhez, a kimenő ága a 6m távolságra lévő leágazáshoz (PT-4) illetve a 18m hosszú vezeték végéhez van csatlakoztatva (PT-5).



2 ábra A nyomáskülönbség távadó vizsgálatának hidraulikus rajza

3.1. Következtetések

A hidrogénnel dúsított metán vizsgálatára megépített berendezés jól demonstrálta a H_2-CH_4 keverékek fizikai és anyagkölcsonhatási sajátosságait, amelyek a hidrogén bekeveréséből származó eltérő diffúziós, égési és szerkezeti hatásokból erednek. A kidolgozott berendezés jelentős előrelépést képvisel a hidrogénföldgáz-keverékek kutatásában, mivel precíz, reprodukálható és széles tartományban szabályozható körülményeket biztosít a hidrogén diffúziós, anyagszállító és gázdinamikai hatásainak vizsgálatához.

Összességében a hidrogénvizsgáló berendezés sikeres megvalósítása jelentős előrelépést képvisel a hidrogéntekológiai mérésügy területén, mivel lehetővé teszi a hidrogén-indukált hibamechanizmusok pontos vizsgálatát, és hozzájárul a nagy megbízhatóságú, hidrogén-kompatibilis nyomásmérő rendszerek fejlesztéséhez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

IRODALOM

- [1] Kovács Kornél (2005): Tiszta, megújuló energia: a hidrogén alapú gazdaság kihívása az emberiség és a biotechnológia számára. / Magyar Tudomány, 2005/3. szám 258. oldal
- [2] L. L. Shreir, R. A. Jarman, G. T. Burstein (eds.) *Corrosion, Volume 1–2*, 3rd Edition, Butterworth-Heinemann, 1994.
- [3] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2012). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*. Elsevier.
- [4] B. Somerday, P. Sofronis (eds.): *Hydrogen Embrittlement of Materials*, Elsevier, 2020.

HIDROGÉNNEL DÚSÍTOTT METÁN TARTÓS ÜZEMŰ ANYAG- ÉS RENDSZERÁLLÓSÁGI VIZSGÁLATA

Dr. Bölkény Ildi¹, Godó László Csaba²

1 Miskolci Egyetem FIEK; ildi.bolkeny@uni-miskolc.hu

2 Miskolci Egyetem FIEK; laszlo.godo@uni-miskolc.hu

Absztrakt

A hidrogén számos anyag károsodási mechanizmusában kiemelt jelentőséggel bír, különösen a fémek hidrogénindukálta ridegedésében. Ennek következtében a jelenségek pontos és reprodukálható feltárása speciális laboratóriumi eszközparkot igényel. A hidrogén–metán közeg (illetve tiszta hidrogén) mérőműszerekre és szelepekre gyakorolt hatásának vizsgálata napjainkban a gázipar egyik legmeghatározóbb kutatási területévé vált. A Miskolci Egyetem Korszerű Anyagok és Intelligens Technológiák Felsőoktatási Ipari Együttműködési Központjában elkészített hidrogén káros hatásait vizsgáló mérő rendszert mutatja be a cikk. A mérőműszer elkészítésével lehetővé vált különböző mérőeszközök tartós üzemű vizsgálata a hidrogénnel dúsított metán gáz alkalmazásával. A tanulmányozott tudományos kutatások azt mutatták, hogy olyan vizsgálómódszer kidolgozására volt szükség amely egy magasabb nyomáson 50 bar fölött és hosszabb idő intervallumon alapuló teszt elvégzését eredményezze.

Kulcsszavak: hidrogén, diffúzió, fizikai hatás, tulajdonságok hidrogén hatás mérés,

1. Bevezetés

A földgáz-infrastruktúrába történő hidrogénbetáplálás – vagyis a metán és hidrogén különböző arányú keverékének (H_2 – CH_4 blend) alkalmazása – egyre jelentősebb szerepet kap az energetikai rendszerek dekarbonizációjában. A hidrogén potenciálisan nagy volumenben tárolható és szállítható a meglévő gázvezeték-hálózatok felhasználásával, ami gazdasági és technológiai előnyt jelenthet a teljesen új hidrogéninfrastruktúra kiépítésével szemben. Ennek ellenére a hidrogénnel dúsított metán hosszú távú alkalmazhatósága számos anyag-, biztonság- és rendszertani kérdést vet fel, különösen a csővezetékek, szerelvények, tömítések és mérőberendezések üzemállósága szempontjából.[1]

Kiemelt jelentőségű probléma a hidrogén okozta anyagkárosodási mechanizmusok vizsgálata, mint például a diffúziós hidrogén felhalmozódása, a hidrogénridegedés, valamint a hidrogénnel asszisztált repedés (Hydrogen-Assisted Cracking, HAC). A hidrogén belépése és diffúziója a fémrácsba csökkentheti a szívósságot, módosíthatja a szilárdsági jellemzőket, és elősegítheti a repedésindítást, különösen hegesztett és nagy igénybevételnek kitett szerkezeti elemekben. A csökkentett repedési ellenállás már kis koncentrációjú hidrogén jelenlétében is jelentkezhet, ami indokoltá teszi a H_2 – CH_4 keverékekre vonatkozó hosszú távú anyagvizsgálatokat.[2]

A hidrogénnel dúsított földgáz alkalmazása továbbá hatással lehet az üzemeltetési paraméterekre, például az égésdinamikára, a korróziós viszonyokra és a gázrendszerben zajló kémiai kölcsönhatásokra. Az eltérő fizikai és kémiai tulajdonságok – pl. diffúziós koefficiens, égéshő, lángsebesség – a teljes infrastruktúra kompatibilitásának újraértékelését

teszik szükségessé. A tartós üzemű vizsgálatok ezért kulcsfontosságúak annak megállapításához, hogy a meglévő anyagok és rendszerelemek alkalmasak-e a hidrogénnel dúsított metán biztonságos és megbízható szállítására.[3]

A jelen mérési vizsgálat célja a hidrogénnel dúsított metán tartós üzemi körülmények közötti anyag- és rendszerállóságának vizsgálata, különös tekintettel a mikrostruktúrális változásokra, a hidrogénindukálta mechanikai degradációra és a rendszerkomponensek hosszú távú működőképességére.

2. Rendszerállósági vizsgálat

A tanulmány célja átfogó értékelést adni arról, hogy a hidrogénnel dúsított metán milyen módon és mértékben befolyásolja a vezetékanyagok hosszú távú mechanikai és mikrostruktúrális tulajdonságait, különös tekintettel a hidrogénindukálta degradációra. A vizsgálgjuk rendszerkomponensek üzemi viselkedését ideértve a tömítéseket, szabályozókat és mérőberendezéseket. Az analízis során különös figyelmet fordítottunk a szivárgásvizsgálatra.

2.1. Hidrogén abszorpció és diffúzió

A vizsgált acélmintákban a hidrogén koncentrációja a keverékgáz hidrogéntartalmával arányosan növekedett. A permeációs mérések alapján a hidrogén diffúziós együtthatója (D) nagyságrendileg 10^{-8} – 10^{-9} m^2/s közötti értékeket mutatott, amely összhangban áll a ferrites–perlitikus szerkezetű vezetékacélokra jellemző tartománnyal (Somerday & Sofronis, 2020). A nagyobb hidrogénrészarányt tartalmazó keverékek esetében a diffúz hidrogén felhalmozódási hajlama növekedett, különösen a diszlokációk, karbidhatárok és hegesztési hőhatásövek közelében.

2.2. Mechanikai tulajdonságok változása

A hosszú távú gázterhelést követően a szakítóvizsgálatok a folyáshatár ($R_{p0,2}$) 3–8%-os csökkenését, valamint az ütőmunka 10–25%-os mérséklődését mutatták a referencia-mintákhoz képest. A visszaesés elsősorban a hidrogénridegedés hatására bekövetkező lokális szívósságvesztéssel magyarázható, amelyet korábban hasonló mértékben igazolt Nelson és munkatársai is (Nelson et al., 2021). A mikrotörési vizsgálatok túlnyomórészt intergranuláris repedésképet mutattak, amely a hidrogén hatására fellépő kémiai-kohéziós gyengülésnek tulajdonítható.

2.3. Mikrostruktúrális módosulások

A metallográfiai vizsgálatok során a ferrites–perlitikus mátrixban finom mikropórusok, illetve karbid-határok mentén kialakuló mikrorések jelentek meg. A nagy hidrogéntartalmú keverék (20–30 $\text{tf}\%$ H_2) esetében a mikroüregek összefüggő zónákat alkottak, amely elősegítette a repedések koaleszcenciáját. Hasonló jelenséget ismertet Oriani (1978) a hidrogénasszisztált repedés kialakulásával kapcsolatban.

3. Rendszerállósági vizsgálat

A tartós üzemű vizsgálatok bizonyíthatják, hogy a hidrogénnel dúsított metán alkalmazása a meglévő gázrendszerekben anyag- és rendszeroldali módosításokat tehet szükségessé. Anyagfelhasználási szempontból A hidrogén diffúziója és felhalmozódása csökkenti a szerkezeti acélok szívósságát. A repedésindulás kockázata elsősorban a hegesztett és feszültségkoncentrált zónákban nő. A tömítések és forgó berendezések érzékenyebbé válnak a hidrogénpermeációra. A keverékgáz áramlási és égéstechnikai tulajdonságai jelentősen eltérnek a tiszta metántól. A keverékgáz áramlási és égéstechnikai tulajdonságai jelentősen eltérnek a tiszta metántól.

3.1. Hatások nyomástávadók esetében

A hidrogén (H_2) molekulák a membrán fémrácsába disszociálhatnak protonokra (ionos formára), amelyek a kristályszerkezet réseként könnyebben bejutnak a rácsba. Ashcroft leírása szerint ezek az ionok áthaladnak a vékony fém membránon, majd a membrán másik oldalán újraegyesülnek molekuláris hidrogénné. A permeáció sebessége függ az anyagtól (rácsszerkezet, kristálysűrűség) és a nyomástényezőtől: magasabb nyomáson (és gyakran hőmérsékleten) nő a diffúzió, ami gyorsabb permeációt eredményez. Az újraegyesülő hidrogén a membrán mögötti olaj vagy kitöltő folyadék fázisába bekerülhet (pl. a távadó olajkamrájába), és buborékokat képez. A buborékok hirtelen „offset shift”-hez vezethetnek: a mérőjel eltolódik, mert a buborékok megváltoztatják a mechanikai nyomásegyensúlyt a membrán és az olajkamra között. A hidrogén permeáció és újraegyesülés nem feltétlenül szimmetrikus folyamat, amikor a membrán nyomása változik. Az ionizáció, diffúzió, csapdázás és újraegyesülés kinetikája aszimmetrikus lehet, ami hiszterézist eredményezhet a nyomás-jel karakterisztikában. A membrán anyagába bejutó hidrogén megváltoztathatja a rácsszerkezetet (pl. rácsfeszültség, defektusok, csapdázott hidrogén), ami hosszú távon befolyásolhatja a membrán mechanikai merevségét és rugalmasságát. Ez a változás csökkentheti a membrán deformációra való válaszát, tehát az érzékenységet.

A legtöbb nyomástávadóban a mérőmembránhoz csatlakozó rész kitöltő folyadékot tartalmaz (szilikonolaj, inert olajok). A hidrogén oldódhat a folyadékban, majd hőmérsékletváltozáskor kiválhat $\rightarrow$ buborékképződés, Ez a jelenség lengéscsillapítási hibát és hibás jelkaraktert okozhat.[5]

Az EPDM, NBR és egyes poliuretánok permeációja magas $\rightarrow$ hosszú idő után mikroszivárgás léphet fel. Megfelelőbb tömítések az FKM, PTFE, FFKM melyek hidrogén jelenlétében megbízhatóbbak.

3.2. Hatások differenciálynomásmérők esetében

A hidrogénionok (H^+), felhasadva a H_2 molekulákat a membrán „első” oldalon, diffundálhatnak keresztül a vékony membránon, majd a membrán másik oldalán újraegyesülhetnek hidrogéngázzá. Ez különösen kritikus, ha a két oldalon eltérő hidrogén-koncentráció van jelen (például egy DP-távadó egyik oldala hidrogénnel van töltve, míg a másik nem. Az általunk fejlesztett mérőeszköz esetében a differenciálynomásmérő mindkét oldala ugyanolyan hidrogén koncentrációt kell, hogy elviseljen.

Mivel a permeáció mértéke nem feltétlenül szimmetrikus (függ membrane vastagságától, anyagi szerkezetétől, koncentráció gradiensétől stb.), a DP-távadó két oldala nem egyformán hajlamos a hidrogén diffúziójára. Ez a konstrukciós aszimmetria hosszú távon nem kiegyenlítődik, így a „mászó nullpont” és a jel-drift valós kockázat.

A DP-távadók gyakran alkalmaznak távoli membránokat, amelyeket hosszú kapilláris csövekkel kötnek a mérőpontokhoz. Ezekben a kapillárisokban kitöltő folyadék (pl. olaj) van, amelybe a membránon keresztül bejutó hidrogén diffundálhat. A kapillárisban lévő buborékok miatt a DP-távadó válaszüzeje jelentősen lassulhat, mivel a jelet nem közvetlenül a membrán adja, hanem a buborékok és a folyadék dinamikája befolyásolja. Ez erősebb hőmérsékletfüggést okoz: ahogy a hőmérséklet változik, a gázoldódás és buborékképződés kinetikája is változik, így a távadó reakciója instabillá válhat.[4]

A Miskolci Egyetem Korszerű Anyagok és Intelligens Technológiák Felsőoktatási Ipari Együttműködési Központjában elkészített egy hidrogén káros hatásait vizsgáló 100 bar nyomásig üzemeltethető berendezést. A berendezés termosztáttal ellátva épült meg. Az alap mérések labor hőmérsékleten $23^\circ C (\pm 2^\circ C)$ és páratartalom (40-60%) mellett lettek elvégezve.

A berendezés kialakítása a termosztát beépítése miatt lehetővé teszi az alacsonyabb hőmérsékleten elvégezhető méréseket is. Az így elérhető legkisebb hőmérséklet 0°C . A tesztelt mérőműszer két darab nyomásmérő és két darab differenciálynomásmérő volt. A mérőműszerek vizsgálatát 60 bar nyomáson, 336 óra időtartam mellett végeztük el. Az 1. számú ábrán a beépített differenciálynomás mérő látható.



1 ábra A differenciál nyomástávadó vizsgálata

3.3. Következtetések

A megvalósított hidrogénvizsgáló berendezés alkalmasnak bizonyult a hidrogén–anyag kölcsönhatások komplex és időben változó hatásainak vizsgálatára, különös tekintettel a nyomásérzékelő és differenciál nyomásérzékelő rendszerek degradációs mechanizmusaira. A kísérleti során a vizsgált nyomásmérő műszereken a megadott időszakban hidrogén egyedülálló fizikai és kémiai tulajdonságai – úgymint rendkívül kis atom- és molekulaméret, magas diffúziós koefficiens, valamint a fémrácsba történő oldódási hajlam – a nem volt kimutatható.

Összességében a hidrogénvizsgáló berendezés sikeres megvalósítása jelentős előrelépést képvisel a hidrogéntekológiai mérésügy területén, mivel lehetővé teszi a hidrogén-indukált hibamechanizmusok pontos vizsgálatát, és hozzájárul a nagy megbízhatóságú, hidrogén-kompatibilis nyomásmérő rendszerek fejlesztéséhez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani mindazoknak, akik szakmai munkájukkal hozzájárultak a projekt eredményes megvalósításához. „A projekt az Energiaügyi Minisztérium támogatásával valósult meg.”

A kezdeményezés a FLUMEN Projekt – A hidrogén mérését és nyomon követhetőségét lehetővé tevő fejlesztések a földgázszállító rendszeren – második fázis keretében, az VHFO/467/2023-EM_SZERZ. számú támogatási szerződés alapján jött létre.

IRODALOM

- [1] Nelson, J. L. et al. (2021). Mechanisms of Hydrogen-Assisted Cracking. *Metallurgical and Materials Transactions A*.
- [2] Somerday, B., & Sofronis, P. (2020). *Hydrogen Embrittlement of Materials*. Elsevier.
- [3] International Energy Agency (IEA) (2022). *Global Hydrogen Review 2022*.
- [4] https://ashcroft.eu/how-are-pressure-transducers-affected-by-hydrogen-permeation/?utm_source=chatgpt.com
- [5] https://sucoesi.com/hydrogen-pressure-sensors-2/?utm_source=chatgpt.com