

Wien, am 01.02.2024

Abschlussbericht über das Projekt „H2 live am Bau“

Projektbeschreibung

Im Rahmen des vom Bau.Energie.Umwelt Clusters Niederösterreich der Wirtschaftsagentur „ecoplus“ ins Leben gerufenen Projektes „H2 live am Bau“ wurde der Generator von fünf verschiedenen Firmen einem Praxistest unterzogen und dessen praktische Handhabung erprobt. Die beteiligten Baufirmen und deren Einsatzgebiete sind folgende:

- Gebrüder Haider&Co (Mo 11. September – Fr 22. September 2023): Wohnhaus-analage mit Containerburg in Wr. Neustadt
- Hengl (Mo 25. September – Fr 6. Oktober 2023): Verwaltungsgebäude und Werkstatt beim Steinbruch, sowie Pumpenanlage einer Tankstelle in Atzelsdorf
- Strabag (Mo 9. Oktober – Fr 20. Oktober 2023): Werkhof der Züblin Spezialtiefbau/Strabag-BMTI, somit Test als Werkstattbetrieb in Trumau
- Appel (Mo 6. November – Fr 17. November): in Vitis im Waldviertel
- Leyrer+Graf (Mo 20. November – So 3. Dezember): in Gmünd

Aus all diesen Testbetrieben konnten wichtige Erkenntnisse zu den Einsatzmöglichkeiten, der Handhabung im Betrieb, dem Wasserstoffverbrauch und auch zu Aspekten der Arbeitssicherheit gewonnen werden. Die teilnehmenden Unternehmen sollen aufgrund ihrer gesammelten Erfahrungen mit dem H₂Genset-Generator in der Lage sein, neue Richtungen mit ihrem Unternehmen einzuschlagen und alternative Wege zu gehen. Das erworbene Wissen soll ihnen dabei helfen durchdachte und zukunftsweisende Entscheidungen zu treffen, um der CO₂-neutralen Baustelle einen Schritt näher zu kommen.

H₂Genset-Generator

Der von der Firma TEST-FUCHS für das „H2 Live am Bau“-Projekt zur Verfügung gestellte Wasserstoffgenerator, ist der sogenannte H₂Genset-Generator. Dieser wird auf fünf Testbaustellen in Österreich zur Erzeugung von Baustrom eingesetzt und der Einsatz dieser Technologie auf Baustellen damit erprobt.

Technischer Aufbau und Funktionsweise

Das Grundkonzept des H₂Genset-Generators (**Abb. 1**) ist jenes eines mobilen Stromaggregats, welches flexibel an unzugänglichen Orten oder auf kleineren Baustellen seine Anwendung finden soll. Weiters könnte es laut der Firma TEST-FUCHS auch als temporärer Energieversorger auf Veranstaltungen oder als Notstromversorgung verwendet werden.



Abb. 1: Der H₂Genset-Generator

Der auf einem zweiachsigen Anhänger montierte Generator, der an den Teststandorten zum Einsatz kommt, basiert auf der Brennstoffzellentechnologie. Dazu werden PEM-Brennstoffzellen der Marke EFOY genutzt, welche aus den Ausgangsprodukten Wasserstoff und Sauerstoff elektrische Energie erzeugen. Diese wird in Batterien gespeichert und bei Anschluss eines Verbrauchers über einen Wechselrichter abgegeben. Als einziges Nebenprodukt entsteht hierbei Wasserdampf. Die Funktionsweise des H₂Genset-Generators wird in **Abb. 2** schematisch dargestellt.

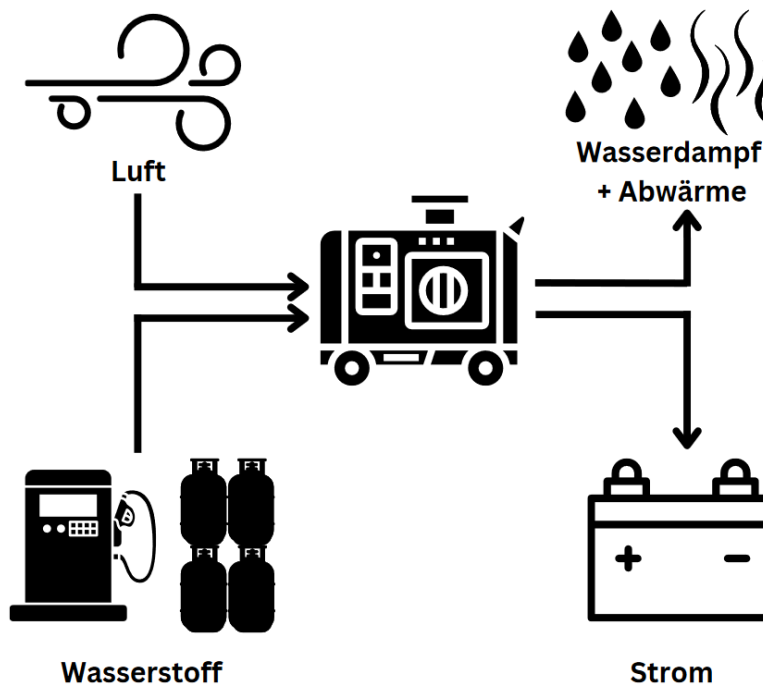


Abb. 2: Funktionsweise des H₂Genset-Generators

Gesteuert wird der Generator über eine Bedienleiste (siehe **Abb. 3**). An dieser lässt sich mit dem Wahlschalter das Gerät ein- bzw. ausschalten, in den Stand-by-Modus oder den Betankungsmodus umschalten. Zusätzlich sind dort die Erdungsklemme, ein Not-Aus-Schalter, ein Batterie Hauptschalter, sowie ein Hauptschalter zur Steuerung der Steckdose für externes Laden der Batterien angebracht. Folgende Steckdosen sind an der Bedienleiste zu finden:

- 3x Schutz-Kontakt Steckdose mit 16A
- 1x Steckdose mit 3x 400 VAC und 32 A
- 2x Steckdose mit 3x 400 VAC und 16 A
- Eine Steckdose (AC) zum externen Laden der Batterien

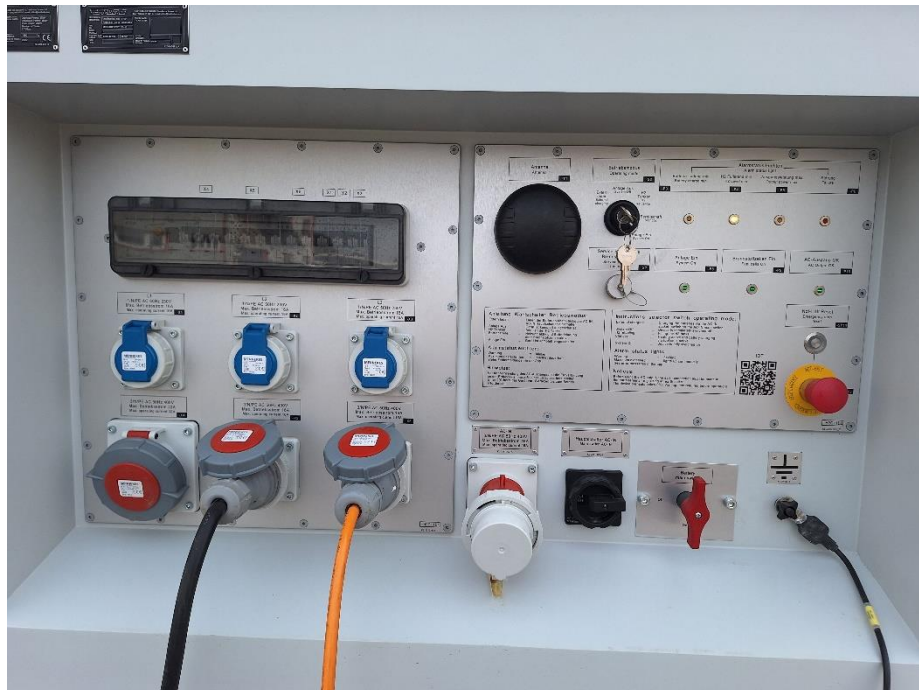


Abb. 3: Bedienleiste

Der Aufbau des Geräts beinhaltet, abhängig vom Modell, eine bestimmte Anzahl an integrierten Wasserstofftanks, welche an einer H₂-Tankstelle befüllt werden können. Alternativ lässt sich die Wasserstoffversorgung des Generators mittels Anschluss von externen Tanks, an einer dafür vorgesehenen Betankungsschnittstelle, (z.B. einem 12er-Gasflaschenbündel) realisieren (siehe **Abb. 4**). Bei dem verwendeten Prototyp-Generator erfolgt die Wasserstoffversorgung ausschließlich über externe Tanks – die integrierten Wasserstofftanks werden erst bei den Vorseriengeräten zum Einsatz kommen. Die Überwachung der korrekten Funktionsweise und des Stromverbrauchs erfolgt über eine Internet-of-Things(IoT)-Lösung, bei der eine Vielzahl an Sensoren quantitativ messbare Werte (z.B. Tankdruck, Batterie-Output, GPS-Daten uvm.) aufzeichnen und in eine Cloud laden. Auf diese kann nach Login über die Testfuchs-Website oder eine App zugegriffen und das Gerät aus der Ferne überwacht werden. Zusätzlich sind die Messwerte in Grafiken veranschaulicht und Fehlermeldungen können eingesehen werden.



Abb. 4: Zwei 12er-Gasflaschenbündel

Technische Daten

Der H₂Genset-Generator lässt sich durch die in **Tab. 1** aufgelisteten technischen Kennzahlen beschreiben:

Tab. 1: Technische Kennzahlen des H₂Genset-Generators laut Hersteller

Technische Kennzahl	Nennwert
Spitzenleistung	27 kW
Dauerleistung	10 kW
Ausgangsspannung	48 VDC oder 230/400 VAC
Verbrauch	ca. 0,06kg H ₂ /kWh
H ₂ -Tanks	7 Stück je 14,6 kg H ₂
Tankdruck	700 bar
Tankdruck (externer Anschluss)	300 bar
max. Betriebsdauer bei 10kW	24 h
Energiekapazität	243 kWh _{el}
Abmessungen inkl. Anhänger	1.974 x 1.400 x 1.820 mm (L x B x H)

Ein wichtiger Aspekt ist die geforderte Reinheit des Wasserstoffs. Bei den verwendeten Brennstoffzellen darf ausschließlich Wasserstoff mit einer Reinheit von 3.0 oder besser verwendet werden. Dies besagt, dass im verwendeten Gas ein Anteil von mindestens 99,9% reiner H₂ sein muss. Chemische Verunreinigungen dürfen nur zu wenigen ppm enthalten sein: z.B. Wasser (100 ppm), Sauerstoff (50ppm), Helium (300ppm).

Datenauswertung

Zur Auswertung des Stromverbrauchs, der Stromproduktion und des Wasserstoffverbrauchs wurde die IoT-Lösung herangezogen. Leistung, Stromverbrauch und andere Parameter werden hier für den jeweiligen Testzeitraum ausgegeben.

Angeschlossene Verbraucher und Stromverbrauch

Über die IoT-Plattform können Leistung und Stromverbrauch abgelesen werden. Dafür werden automatisch während des Betriebes Datenpunkte erstellt, welche einen gewissen Zeitpunkt (Datum und Uhrzeit auf die Sekunde) mit der zugehörigen Leistung verknüpfen. Ein Datenpunkt wurde immer dann erstellt, wenn sich der betrachtete Wert geändert hat. Durch Differenzbildung der Zeitpunkte konnten die Zeiträume ermittelt werden, in denen die jeweilige Leistung am Generator gemessen wurde. Die verbrauchte elektrische Energie steht im engen Zusammenhang mit den angeschlossenen Verbrauchern, welche bei jeder Projektbaustelle variierten. Der hier ausgewertete Stromverbrauch stellt den tatsächlich aus dem H₂-Genset-Modul erhaltenen Strom dar, welcher bei den Endverbrauchern ankommt.

Stromverbrauch der Testbaustellen

Der Stromverbrauch wurde über die gesamte Dauer des Testbetriebes auf allen 5 Baustellen ausgewertet und in den folgenden Kapiteln beschrieben.

1. Gebrüder Haider&Co

Die Firma Gebrüder Haider&Co nutzte den H₂Genset-Generator zwei Wochen im September 2023 auf einer Baustelle zur Errichtung eines Wohnkomplexes mit 102 Einzelwohnungen und einem Kindergarten. Dabei versorgte der Generator eine Containerburg mit insgesamt 14 Containern (1x Doppelcontainer Besprechung; 1x Doppelcontainer Polier; 2x Sanitätscontainer; 6x Mannschaftscontainer; 2x Magazincontainer) mit elektrischer Energie. Geplant war eine kombinierte Stromerzeugung durch eine PV-Anlage (auf der Containerburg) und den H₂Genset-Generator, was jedoch durch eine zu geringe Auslastung des Generators nicht zustande kam. In **Abb. 2** ist der tägliche Stromverbrauch in kWh zu sehen. Dabei fällt auf, dass am Wochenende (bzw. in der ersten Woche auch am Freitag) keine Stromverbraucher an den Wasserstoffgenerator angeschlossen waren, da hier die verbrauchte Energie gleich Null war. Der Mittelwert des Stromverbrauchs beläuft sich auf 13,2 kWh pro Tag, wenn nur jene Tage betrachtet werden, an denen auch Energie verbraucht wurde. **Abb. 6** ist die Summenfunktion des Stromverbrauchs über die zwei Testwochen und gibt Aufschluss über die gesamte verbrauchte elektrische Energie. Am Ende des Testbetriebes hat die Firma Gebrüder Haider&Co also insgesamt rund 118 kWh an Strom verbraucht.

Der Generator zeichnete in der ersten Woche vom 11.09.2023 um 10 Uhr bis zum 14.09.2023 um 15 Uhr einen Stromverbrauch auf und in der zweiten Woche vom 18.09.2023 ab 6:30 Uhr bis am 22.09.2023 um 13 Uhr. Dadurch wurde über einen Zeitraum von insgesamt 179,5 Stunden elektrische Energie aus dem H₂Genset bezogen, was (bezogen auf die 118 kWh) zu einer durchschnittlichen Verbrauchsleistung von ca. 0,66 kW führt. Erkennbar aus den Daten war, dass während der gewöhnlichen Arbeitszeiten aber auch Leistungen von über 5 kW erreicht wurden und während des Zeitraums von 17-6 Uhr vergleichsweise geringe Leistungen zu verzeichnen waren. Das liegt daran, dass die Containerburg Tags durch Licht, Sanitäranlagen und eingeschaltete Büroeinrichtung einen deutlich höheren Verbrauch aufwies.

Stromverbrauch in kWh/Tag

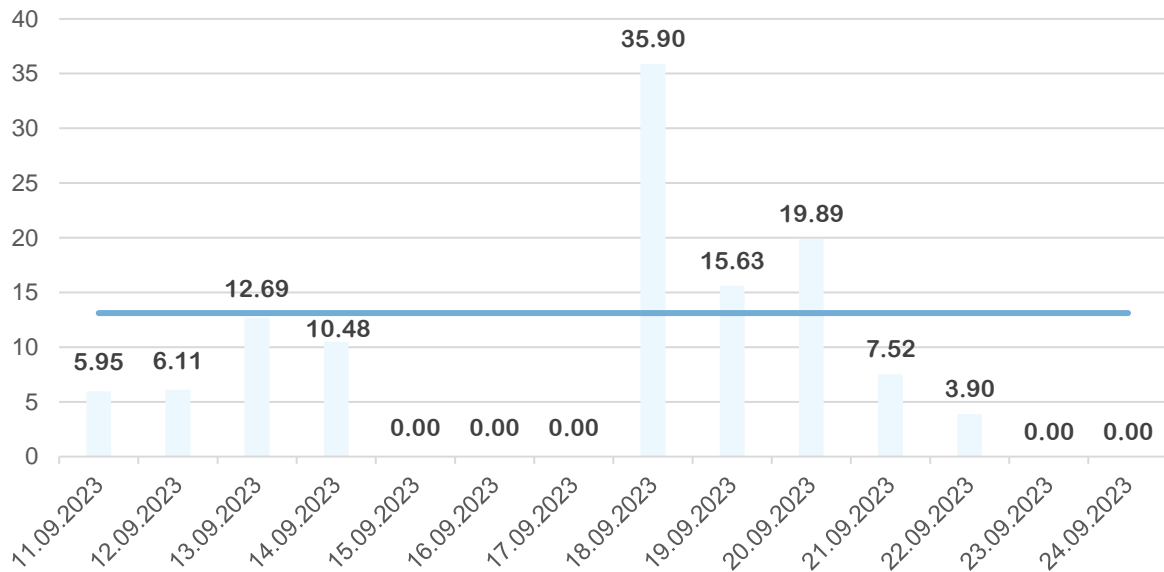


Abb. 5: Täglicher Stromverbrauch der Firma Gebrüder Haider&Co

Summe des Stromverbrauchs in kWh

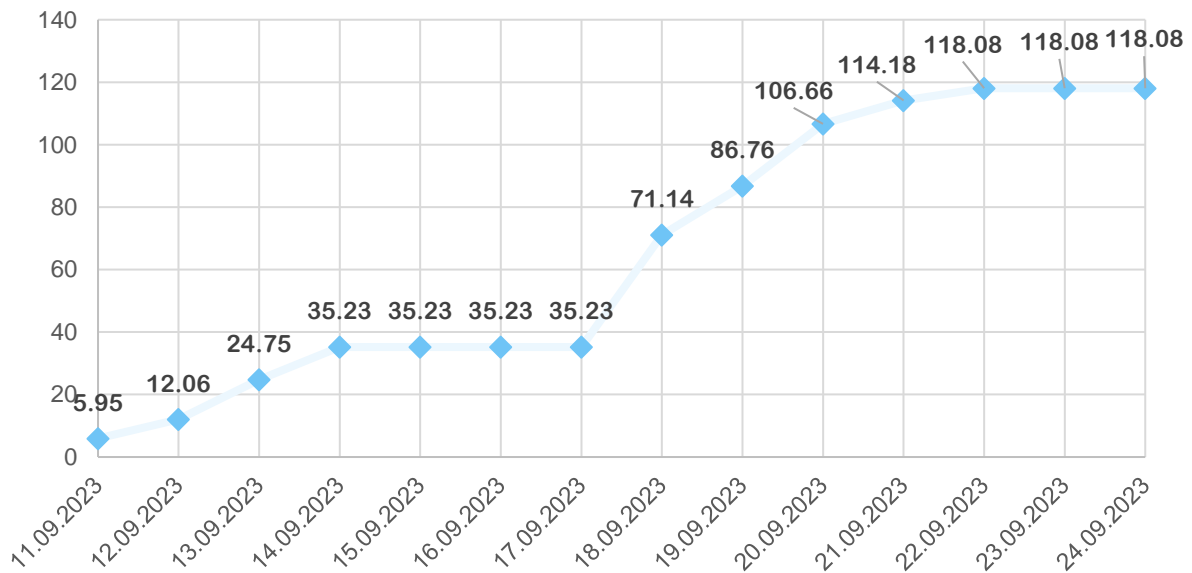


Abb. 6: Summierter Stromverbrauch der Firma Gebrüder Haider&Co

2. Hengl

Bei der Firma Hengl kam der H₂Genset in Zwei Wochen im September/Oktober 2023 auf zwei verschiedenen Orten zum Einsatz. Durch einen defekten Wasserstoff-Schlauch, welcher am 25.09.2023 bemerkt wurde, konnte der Testbetrieb erst nach Fertigung eines neuen Schlauchs am 26.09.2023

den Generator nutzen. Die beiden Einsatzgebiete waren Steinbrüche (in Limberg und Atzelsdorf), wobei in Limberg der Generator der Versorgung am Tag der offenen Tür diente. Dort wurde unter anderem ein Elektroauto geladen, Kühlanhänger, Präsenter, Fernseher und Beleuchtungseinrichtungen mit elektrischer Energie versorgt. Im Gegensatz dazu wurden in Atzelsdorf elektrisch betriebene Werkzeuge, (z.B. Schweißgeräte und Bohrmaschinen) damit betrieben.

Ebenfalls wurde versucht, einen weiteren Kühlanhänger mit etwas älteren Kühlaggregaten mittels des Wasserstoffgenerators zu speisen, was aber nicht funktionierte, da hier die Sicherung flog. Laut Herrn Wimmer, der bei der Firma Hengl für Energiethemen zuständig ist, lag dies an den zu hohen Einschaltströmen des alten Geräts und nicht daran, dass der Wasserstoffgenerator die nötige Dauerleistung des Kühlanhängers nicht erbringen könnte.

Der tägliche Stromverbrauch (siehe **Abb. 7**) zeigt, dass nur an sieben der insgesamt vierzehn Tagen tatsächlich Verbraucher angeschlossen waren. Am Tag der offenen Tür am 29.09.2023 war der Stromverbrauch mit rund 27,3 kWh am höchsten. Der Mittelwert des Stromverbrauchs beläuft sich auf ca. 7,3 kWh/Betriebstag (orangene Linie in **Abb. 7**). In der zweiten Woche (Betrieb in Atzelsdorf), ist zu erkennen, dass die kleinen elektrischen Maschinen nur einen geringen Stromverbrauch aufweisen, welcher durch den Generator leicht abgedeckt werden konnte.

Aus **Abb. 8** lässt sich der Gesamtverbrauch von 51,07 kWh an elektrischer Energie des Testbetriebs erkennen. Hier sieht man, dass vor allem der 29. und 30. September die Tage, mit dem größten Anteil am gesamten Stromverbrauch, waren. In einem Zeitraum von 84 Stunden zeichnete der H2Genset einen Stromverbrauch auf, was (bezogen auf die 57,07 kWh Gesamtverbrauch) eine durchschnittliche Verbrauchsleistung von ca. 0,61 kW ergibt. Während der Hauptarbeitszeiten wurden in der Regel um die 2,5 kW erreicht.

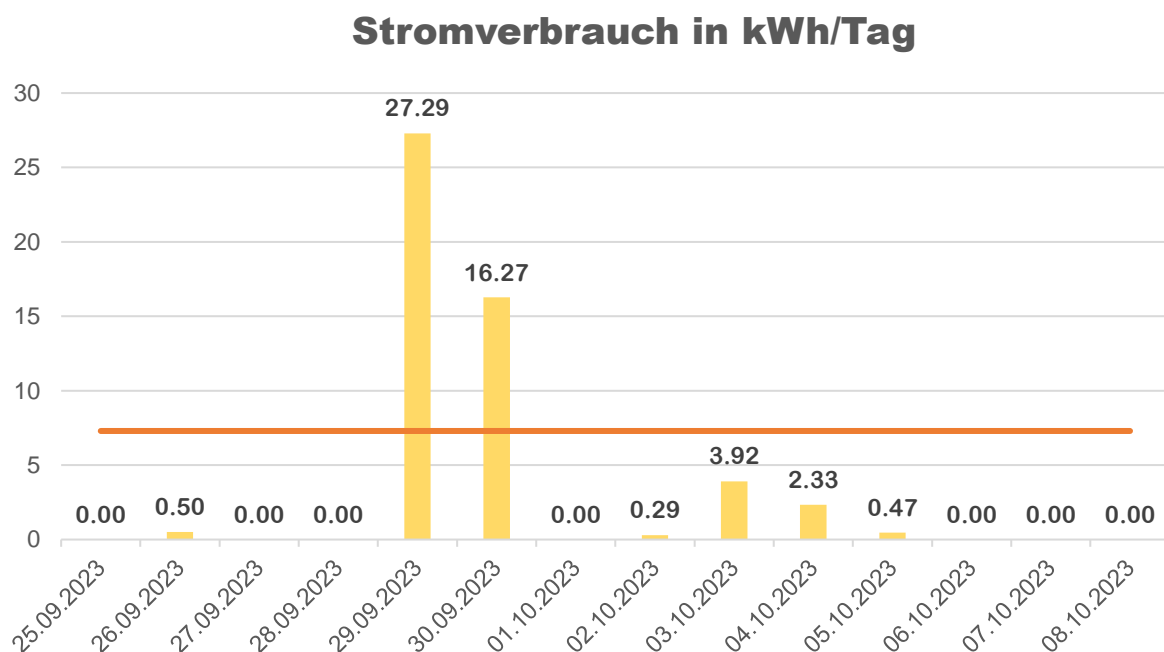


Abb. 7: Täglicher Stromverbrauch der Firma Hengl

Summe des Stromverbrauchs in kWh

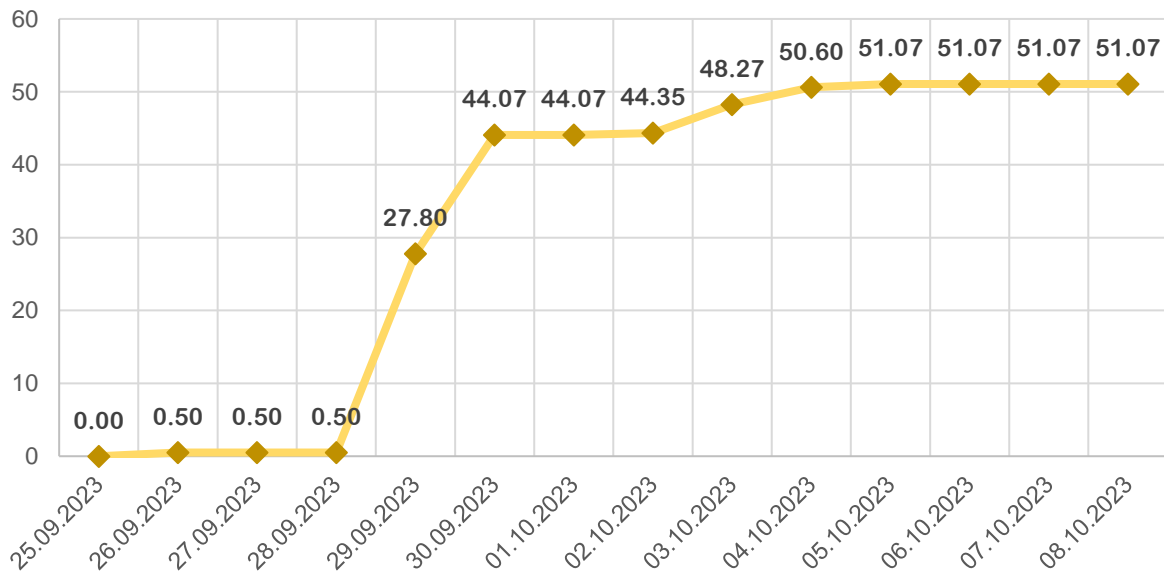


Abb. 8: Summierter Stromverbrauch der Firma Hengl

3. STRABAG/Züblin Spezialtiefbau

Das Unternehmen STRABAG bzw. Züblin Spezialtiefbau setzte den durch den H₂Genset-Generator erzeugten Strom zum Betrieb von der Wasserhaltung (Leistungsbedarf der Pumpe ca. 3 kW) und kleinere Elektrogeräte, wie einen Heizstrahler (mit maximal 9 kW), ein. Zusätzlich wurde auch ein Büro-Würfelcontainer (3x3m) testweise vollständig durch den Wasserstoffgenerator mit Energie versorgt. In diesem waren ein Notebook, ein Handy, ein Kühlschrank, sowie die Heizung angeschlossen. Da all diese Verbraucher nur phasenweise angeschlossen wurden, wurde keine externe Backup-Versorgung benötigt.

Mit einem durchschnittlichen Verbrauch von etwa 0,91 kW (200,71 kWh in 220,25 Stunden Betriebszeit), ist dieser Testbetrieb einer mit einem eher geringen Stromverbrauch. In Summe betrachtet liegt der Stromverbrauch mit 200,71 kWh sehr hoch im Vergleich zu den anderen Testbetrieben. Der durchschnittliche Verbrauch an elektrischer Energie pro Tag beläuft sich auf ca. 18 kW (orangene Linie in **Abb. 9**). In **Abb. 10** ist zu sehen, dass an fast allen Tagen innerhalb der zwei Testwochen Strom abgenommen wurde. Dies zeigt, dass der Generator über längere Zeit konstant Energie zur Verfügung stellen kann, sofern die Wasserstoffversorgung aufrechterhalten wird. Im IoT-Tool ließ sich die regelmäßige Zuschaltung der Pumpe für die Wasserhaltung gut mitverfolgen, da diese einen steileren Anstieg der Stromverbrauchs-Kurve zur Folge hatte.

Stromverbrauch in kWh/Tag

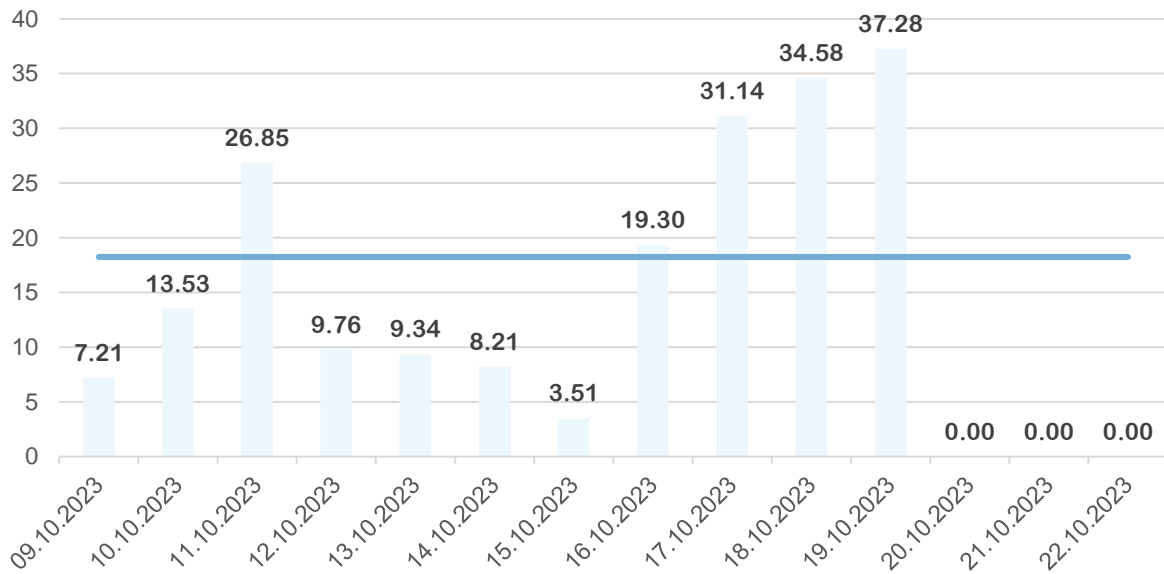


Abb. 9: Täglicher Stromverbrauch der Firma STRABAG/Züblin

Summe des Stromverbrauchs in kWh

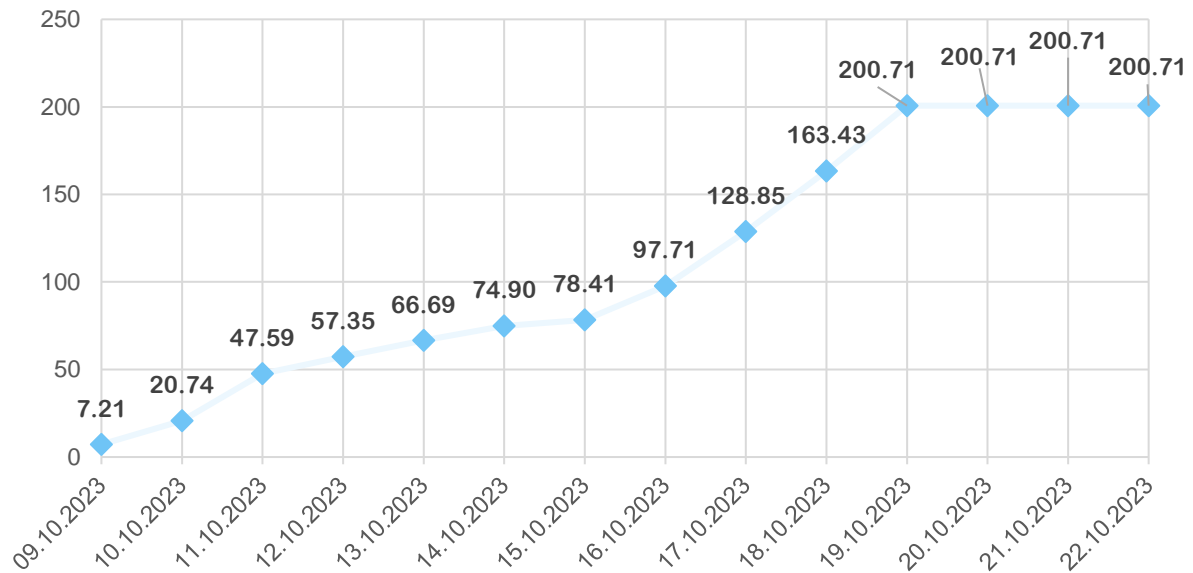


Abb. 10: Summierter Stromverbrauch der Firma STRABAG/Züblin

4. Appel/Nemeton

Bei der Firma Appel bzw. Nemeton kam der H₂GenSet Anfang November 2023 zum Einsatz. Im Zuge des Testbetriebes wurde mit dem durch den Generator erzeugten Strom hauptsächlich ein 3D-Drucker betrieben. Bei diesen war eine hohe Ausfallsicherheit vonnöten, da die Drucker teilweise mehrere

Tage am Stück durchgängig im Betrieb sind und ein Druckstopp sich negativ auf das Endprodukt auswirken könnte und die Produktionszeit verlängert.

In **Abb. 11** ist der Stromverbrauch der Firma Appel pro Tag über die gesamten zwei Wochen dargestellt. Man sieht, dass der Generator nur an wenigen bestimmten Tagen getestet wurde und an neun Tagen überhaupt keinen Verbrauch aufzeichnete. Die dunkelorangene Linie zeigt erneut das Tagesmittel. Diese liegt bei 24,77 kWh/Betriebstag.

Der Generator erreichte in diesem Betrieb einen durchschnittlichen Verbrauch von etwa 3,91 kW (123,85 kWh in 31,68 Stunden Betriebszeit). Das ist im Vergleich zu den anderen Testbetrieben sehr hoch und auf die energieintensiven 3D-Drucker zurückzuführen. In Summe betrachtet (siehe **Abb. 12**) liegt der Stromverbrauch bei 123,85 kWh. Ebenso ist erkennbar, dass mit 61,58 kWh Stromverbrauch an einem Tag der höchste über alle Testbetriebe hinweg erzielt wurde.

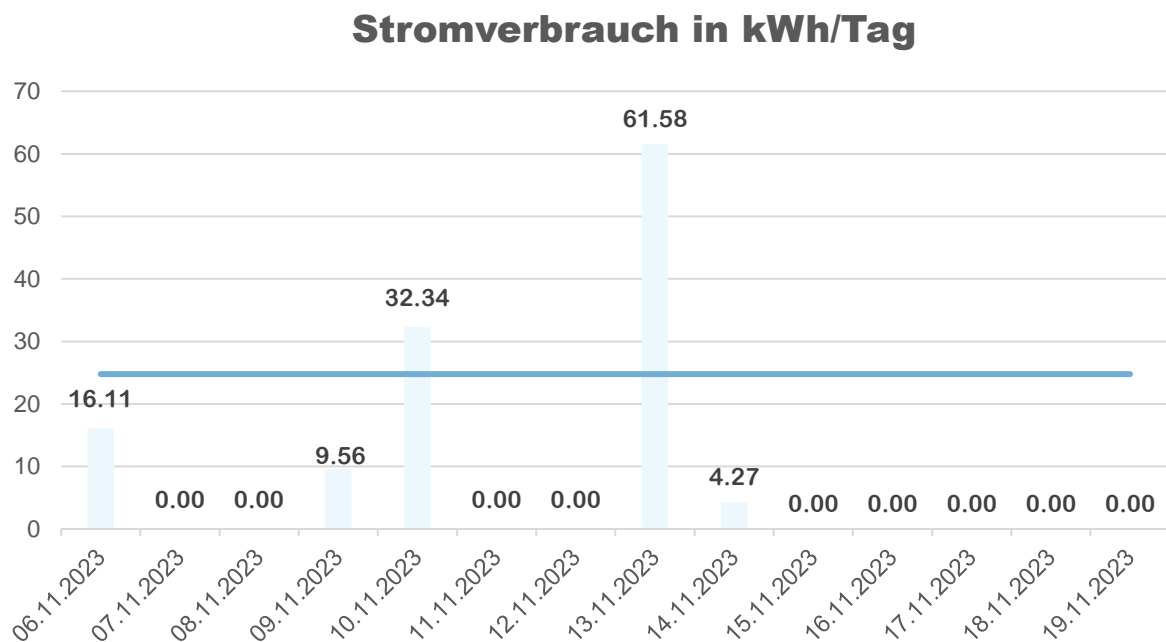


Abb. 11: Täglicher Stromverbrauch der Firma Appel/Nemeton

Summe des Stromverbrauchs in kWh

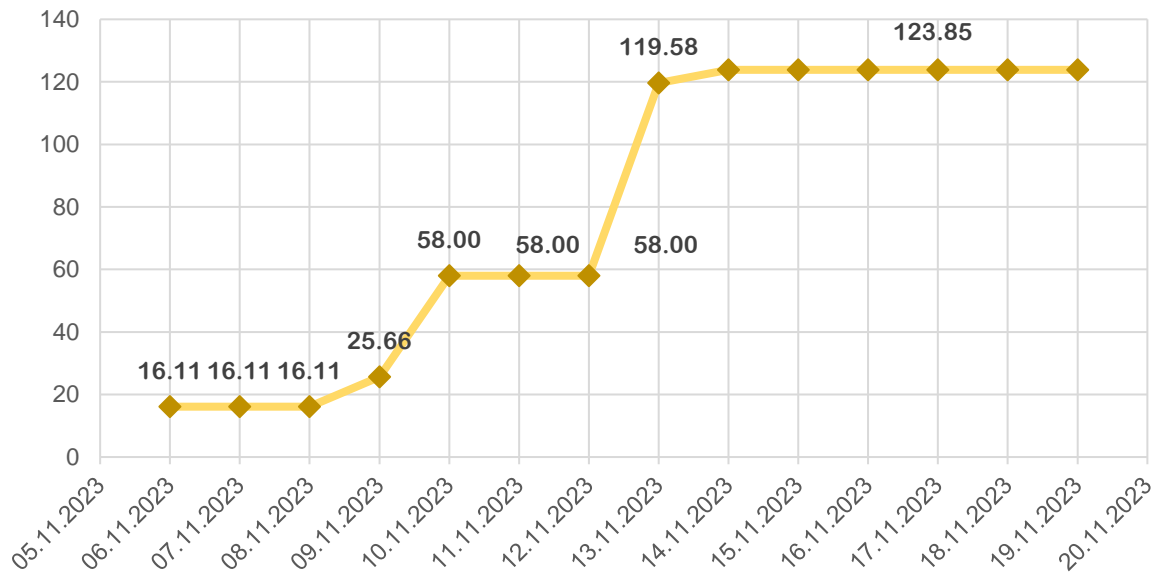


Abb. 12: Summierter Stromverbrauch der Firma Appel/Nemeton

5. Leyrer und Graf

Beim letzten Testbetrieb, der im November/Dezember 2023 auf verschiedenen Baustellen der Firma Leyrer+Graf stattfand, konnten die in **Abb. 13** erkennbaren Stromverbräuche beobachtet werden. Der durchschnittliche Verbrauch lag hier bei ca. 21,37 kWh/Betriebstag. Wie auch bei der Firma Appel wurde der H₂Genset nicht an jedem Tag (sondern nur an sieben von vierzehn) wirklich zur Stromproduktion genutzt. In der ersten Woche diente die erzeugte elektrische Energie zur Versorgung einer „Containerburg“ mit einem Büro-Doppelcontainer (2x2kW), zwei Mannschaftscontainern (2x1kW) und einem Werkzeugcontainer. In der zweiten Woche wurde der Strom sporadisch für Werkzeug und Geräte auf anderen Baustellen verwendet.

Bezieht man auch hier den insgesamt verbrauchten Strom (170,93 kWh siehe **Abb. 14**) auf die 81,02 Betriebsstunden, in welchen der H₂Genset aktiv Strom an die Verbraucher abgab, so lässt sich eine durchschnittliche Verbrauchsleistung von 2,11 kW feststellen.

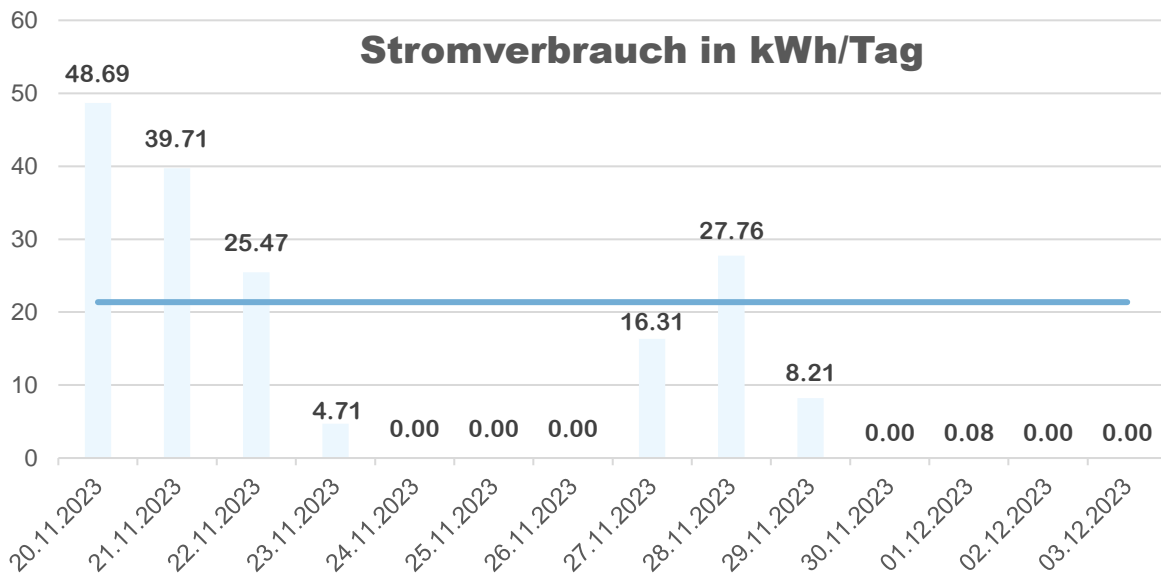


Abb. 13: Täglicher Stromverbrauch der Firma Leyrer+Graf

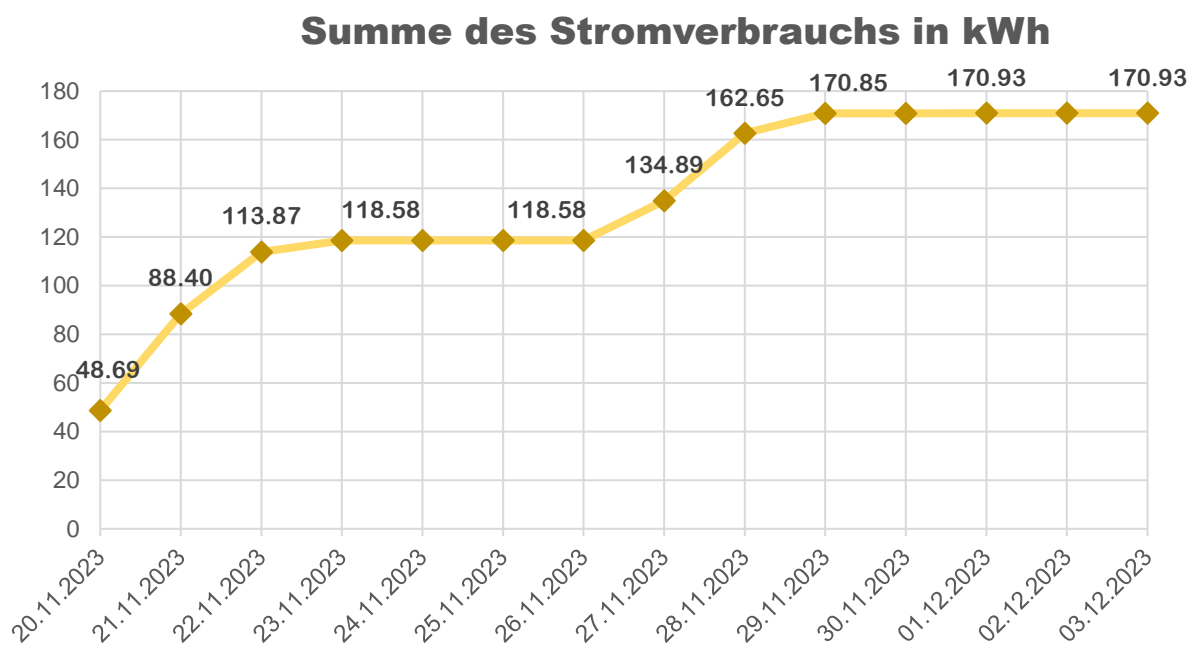


Abb. 14: Summierter Stromverbrauch der Firma Leyrer+Graf

Stromproduktion und Wasserstoffverbrauch der Testbaustellen

Wie die Auswertung der Stromproduktion lief die Auswertung des Wasserstoffverbrauchs über die IoT-Plattform. Für die Berechnung des verbrauchten Wasserstoffes war ursprünglich geplant, über

Temperatur und den Druck im Wasserstofftank über die Gasdruckformel rückzurechnen, wie viel durch die Brennstoffzellen verbraucht wurde. Bei den ersten drei Testbetrieben (Gebrüder Haider&Co, Hengl und STRABAG/Züblin Spezialtiefbau) war jedoch zwischen dem Flaschenbündel und dem H₂Genset ein Druckminderer verbaut, welcher den Druck konstant zwischen 70 und 80 bar hielt. Dadurch war es nicht möglich, aufgrund des Tankdrucks auf den Wasserstoffverbrauch zu schließen, da der Drucksensor ebendiese 70 bar dauerhaft als Tankdruck gemessen hatte. Für diese Betriebe wurde in den weiteren Berechnungen auf den Verbrauch der Flaschenbündel zurückgegriffen, was die Genauigkeit der Auswertung reduziert.

1. Gebrüder Haider&Co

In den zwei Wochen, in welchen der H₂Genset-Generator auf dem Gelände der Firma Gebrüder Haider&Co zum Einsatz kam, wurden durch die vier Brennstoffzellen an insgesamt neun von vierzehn Tagen elektrische Energie aus Wasserstoff gewonnen. Im Schnitt konnten pro Tag etwa 41 kWh Strom (bezogen auf Tage an denen Strom generiert wurde) erzeugt werden (siehe dunkelgrüne Linie **Abb. 15**). Mit 61 kWh war der 18. September 2023 jener Tag, an welchem der Generator am meisten elektrische Energie aus Wasserstoff durch Umwandlung in den Brennstoffzellen herstellte.

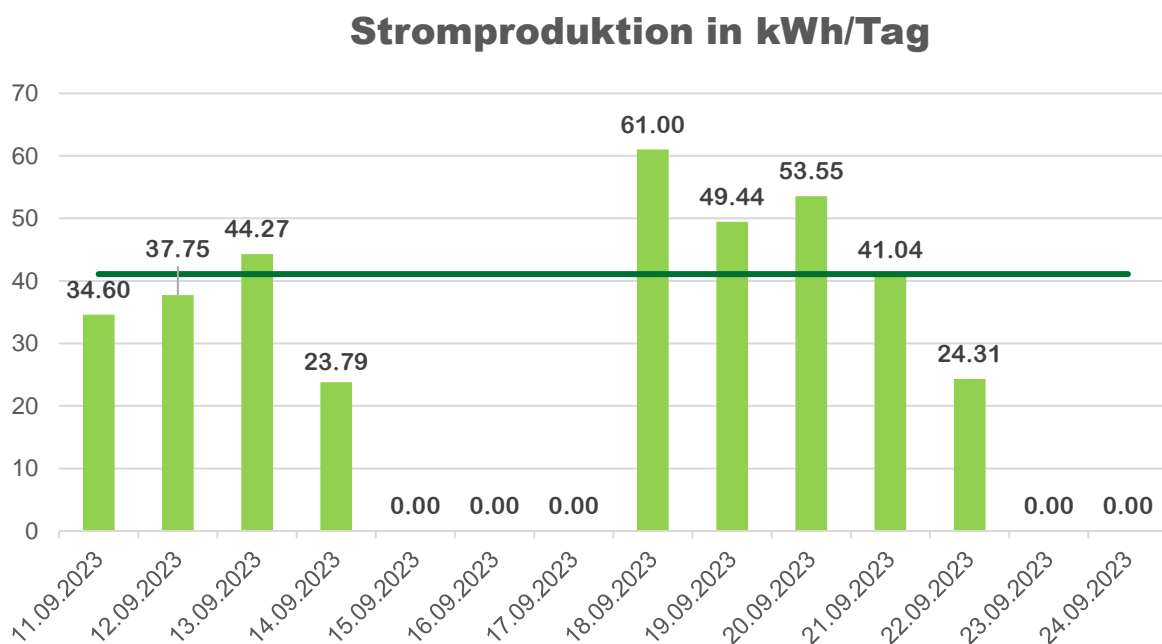


Abb. 15: Tägliche Stromproduktion der Firma Gebrüder Haider&Co

Wird die Summenfunktion der Stromproduktion betrachtet (**Abb. 16**), lässt sich erkennen, dass während der Arbeitstage eine nahezu lineare Stromproduktion stattfand und zum Wochenende hin die Maschine nicht zum Einsatz kam, wodurch der generierte Strom (in kWh) stagnierte. Bezieht man die insgesamt generierten 369,74 kWh Strom auf die Zeit, welche der Generator auch Strom an Verbraucher abgab (179,5 Stunden), dann wurden über diesen Zeitraum im Schnitt ca. 2 kW pro Stunde erzeugt, was deutlich unter der (von TEST-FUCHS) angegebenen Dauerleistung von 10 kW liegt.

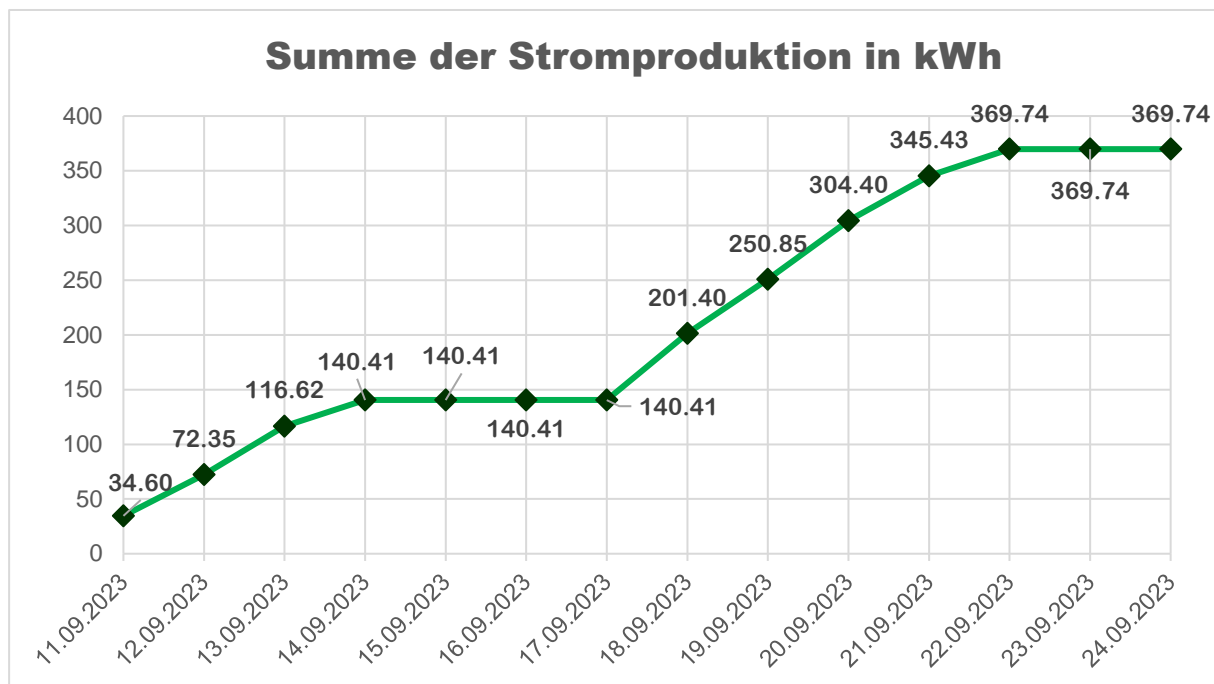


Abb. 16: Summierte Stromproduktion der Firma Gebrüder Haider&Co

Am Ende des Testbetriebes waren beide angelieferten Flaschenbündel zur Gänze aufgebraucht. Da ein Flaschenbündel aus zwölf Flaschen zu je 50 Litern besteht, war die insgesamt verbrauchte Wasserstoffmenge 1.200 Liter. Mittels eines Excel-Tools wurde aus dem Volumen, dem Druck und der Temperatur der Wasserstoffverbrauch in kg rückgerechnet. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Der Druck des Flaschenbündels betrug zu Beginn 278 Bar und 0 Bar am Ende des Testbetriebs
- Die Temperatur wird mit 15°C konstant angenommen

Weiters wurden folgende Konstanten verwendet:

- Van-der-Waals-Konstante (Berücksichtigung Kohäsionsdruck): $0,02464579 \text{ Nm}^4/\text{mol}^2$
- Van-der-Waals Konstante (Berücksichtigung des Kohäsionsvolumens): $2,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$
- Allgemeine Gaskonstante: 8.31 J/mol K

Für diese Testbaustelle wurde ein gesamter Wasserstoffverbrauch von insgesamt ca. 22,5 kg errechnet.

Als Überprüfung der Werte wurde mittels der Angaben des Lieferanten (Firma Linde) eine Kontrollrechnung durchgeführt. Laut den Angaben von Linde besitzt ein Flaschenbündel mit 600 L etwa 151 m³ Wasserstoff (bei atmosphärischem Druck). Weiters liegt die Dichte von Wasserstoff bei 15°C und einem Bar bei um die 0,08418 kg/m³. Bei dem Verbrauch von zwei Flaschenbündel werden somit ca. 25,37 kg Wasserstoff verbraucht, was den durch das Excel-Tool berechneten Wert plausibilisiert. Für die weiteren Betrachtungen wurde ein Verbrauch von 24 kg für zwei Flaschenbündel angenommen.

Wird die Stromproduktion dem Wasserstoffverbrauch gegenübergestellt, lässt sich erkennen, dass für die Erzeugung von 369,74 kWh Strom etwa 24 kg Wasserstoff verbraucht wurden. Dies entspricht etwa 15,41 kWh_{el}/kg Wasserstoff oder 0,065 kg Wasserstoff/kWh_{el}. Dieser Wert liegt etwas über der Herstellerangabe von TEST-FUCHS, welche einen Wasserstoffverbrauch von 0,06 kg/kWh angibt.

Aus diesem Zusammenhang lässt sich der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen bestimmen. Dafür wird der Brennwert von Wasserstoff mit 33 kWh pro Kilogramm H₂ angenommen. **Der Wirkungsgrad beläuft sich bei diesem Testbetrieb somit auf 44 %.**

2. Hengl

Die Auswertung der Daten der Brennstoffzellen zeigt, dass während des Testbetriebes der Firma Hengl insgesamt 181,33 kWh elektrische Energie aus dem genutzten Wasserstoff gewonnen werden konnten (siehe **Abb. 19**). Im Schnitt konnten pro aktiven Tag knapp über 18 kWh Strom generiert werden (dunkelgrüne Linie **Abb. 18**). Man sieht, dass am 29. und 30. September eine sehr hohe Stromproduktion aufgezeichnet wurde, was mit dem starken Stromverbrauch an diesen Tagen korreliert.

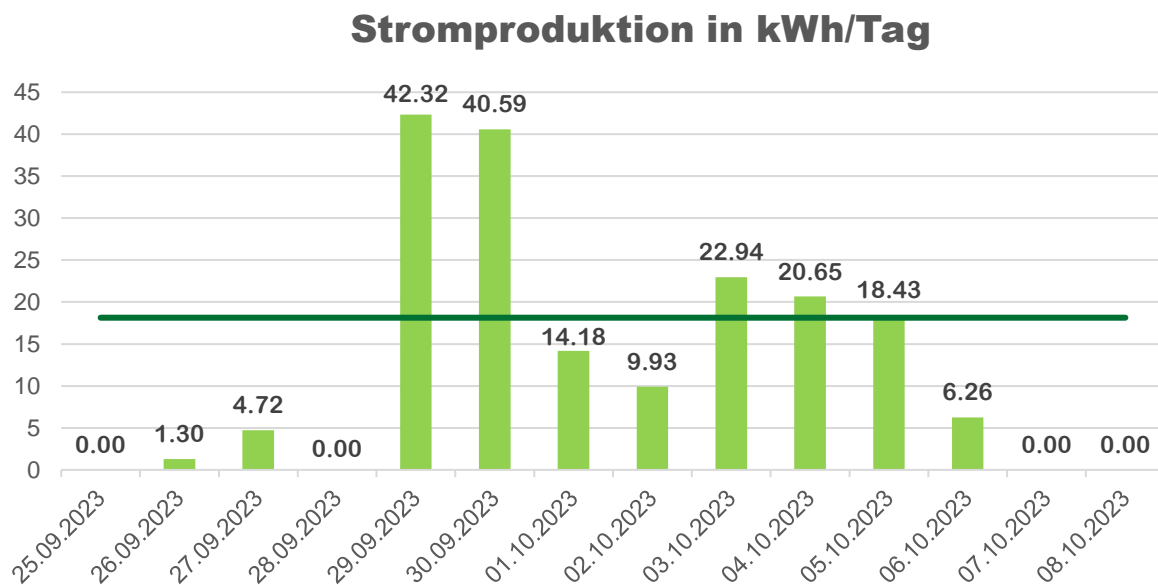


Abb. 18: Tägliche Stromproduktion der Firma Hengl

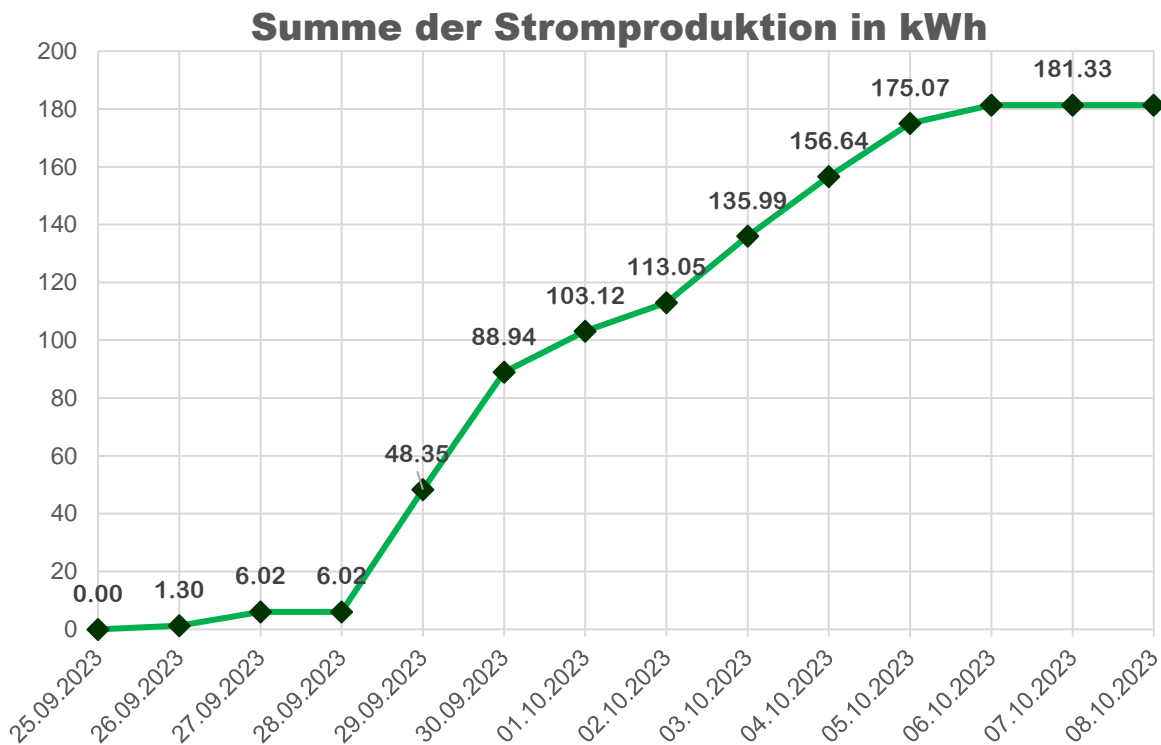


Abb. 19: Summierte Stromproduktion der Firma Hengl

Wird die gesamt generierten 181,33 kWh Strom nur auf jene Zeit bezogen, welche der Generator auch Strom an Verbraucher abgab (84 Stunden) ergibt sich über diesen Zeitraum ein Schnitt von ca. 2,16 kW erzeugtem Strom. Dies entspricht in etwa jenem Wert der Firma Gebrüder Haider&Co und lässt auf eine konstante Leistung schließen.

Laut Angaben der Firma Hengl wurden in den zwei Testwochen rund 11 kg Wasserstoff verbraucht – hier wurden die zwei bereitgestellten Flaschenbündel nicht zur Gänze geleert. Für die Erzeugung von den 181,33 kWh Strom wurden etwa 11 kg Wasserstoff verbraucht. Dies entspricht etwa 16,48 kWh Strom/kg Wasserstoff oder 0,061 kg Wasserstoff/kWh Strom. Dieser Wert ist nahezu gleich der Herstellerangabe von TEST-FUCHS, welche pro Kilowattstunde einen Wasserstoffverbrauch von 0,06 kg angibt. Im Vergleich zur Firma Gebrüder Haider&Co konnte bei der Firma Hengl also etwas mehr Strom aus derselben Menge Wasserstoff gewonnen werden.

Der Wirkungsgrad wird analog zu dem der Fa. Gebrüder Haider&Co berechnet. **Er beläuft sich beim Testbetrieb der Firma Hengl auf 50 %**

3. STRABAG/Züblin Spezialtiefbau

Bei der Firma STRABAG/Züblin konnten insgesamt 406,54 kWh elektrische Energie aus dem genutzten Wasserstoff gewonnen werden (siehe **Abb. 21**). Im Schnitt konnten pro aktiven Tag des H₂Gensets ungefähr 36,96 kWh Strom generiert werden (dunkelgrüne Linie **Abb. 20**). Dieser Testbetrieb wurde sehr aktiv genutzt; der Generator hat an fast allen Tagen Strom produziert. Bei der Einsatzzeit von 220,25 h ergibt sich eine durchschnittliche Stromproduktion von 1,85 kW. Die beiden Flaschenbündel wurden bei diesem Testeinsatz vollständig aufgebraucht, weshalb von einem Wasserstoffverbrauch von 24 kg ausgegangen wird.

Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen beläuft sich beim Testbetrieb der Firma STRABAG/Züblin auf 51 %.

Stromproduktion in kWh/Tag

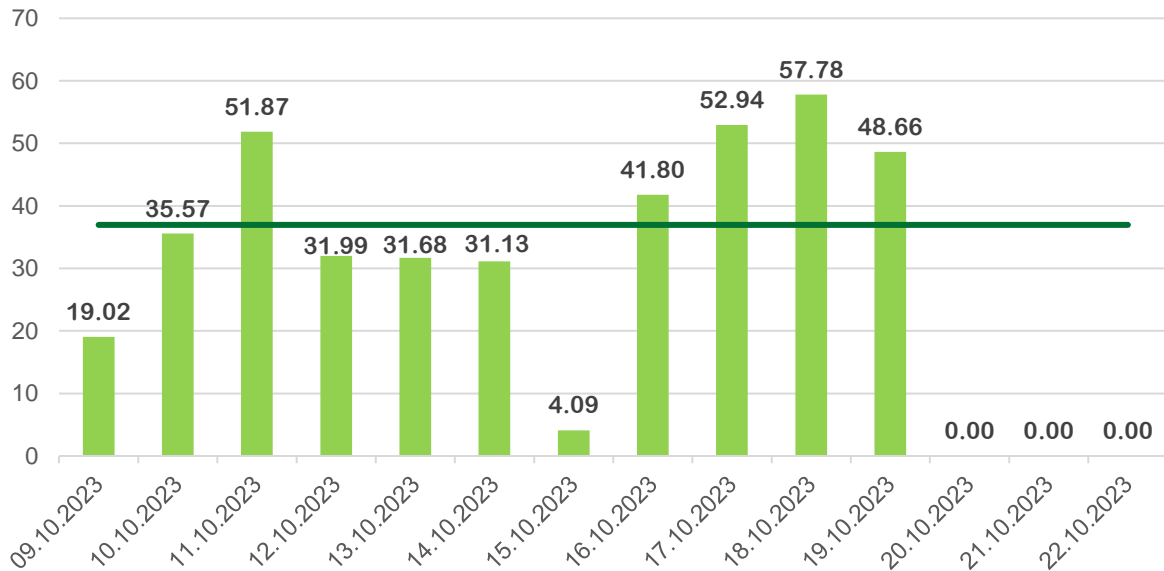


Abb. 20: Tägliche Stromproduktion der Firma STRABAG/Züblin

Summe der Stromproduktion in kWh

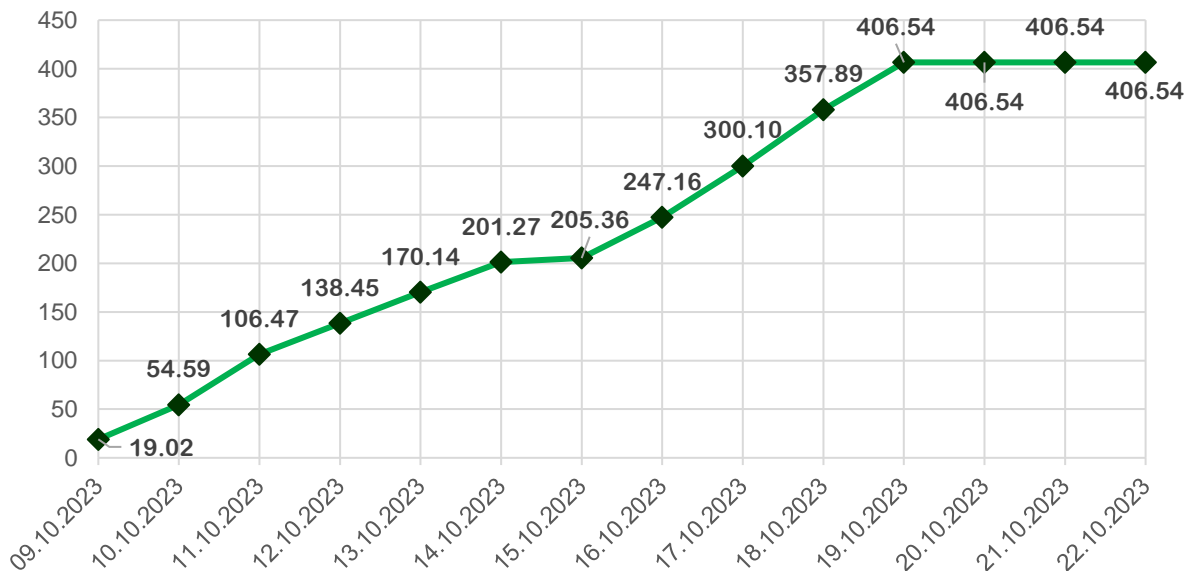


Abb. 21: Summierte Stromproduktion der Firma STRABAG/Züblin

4. Appel/Nemeton

Die Auswertung der Produktionsdaten für die Firma Appel zeigt eine durchschnittliche tägliche Stromproduktion von etwa 32,4 kWh (siehe dunkelgrüne Linie **Abb. 22**). Wie auch schon in den Daten des Stromverbrauchs ersichtlich, wurde der H₂Genset hier nur an wenigen Tagen eingesetzt, dafür war

aber der 13.11.2023 hinsichtlich der Stromproduktion (und auch des Verbrauchs) der Tag mit den höchsten Werten über alle Testbetriebe hinweg. Insgesamt wurden durch die Brennstoffzellen während des zweiwöchigen Testbetriebes 162,01 kWh elektrische Energie aus Wasserstoff umgewandelt (siehe **Abb. 23**). Die durchschnittliche Produktionsleistung des Testbetriebs betrug 5,11 kW.

Für die Erzeugung von insgesamt 162,01 kWh Strom waren etwa 8,93 kg Wasserstoff erforderlich. Dies beruht auf denselben Überlegungen zur Verbrauchsberechnung wie in Kapitel 4.21. Bei diesem Testbetrieb (nur ein Flaschenbündel) konnte erstmalig der tatsächliche Druck abgelesen werden, welcher zum Start des Testbetriebes 278,09 bar und zum Ende 48,60 bar betrug. Dies entspricht etwa 18,14 kWh Strom/kg Wasserstoff oder 0,055 kg Wasserstoff/kWh Strom. **Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen beläuft sich beim Testbetrieb der Firma Appel/Nemeton auf 55 %.**

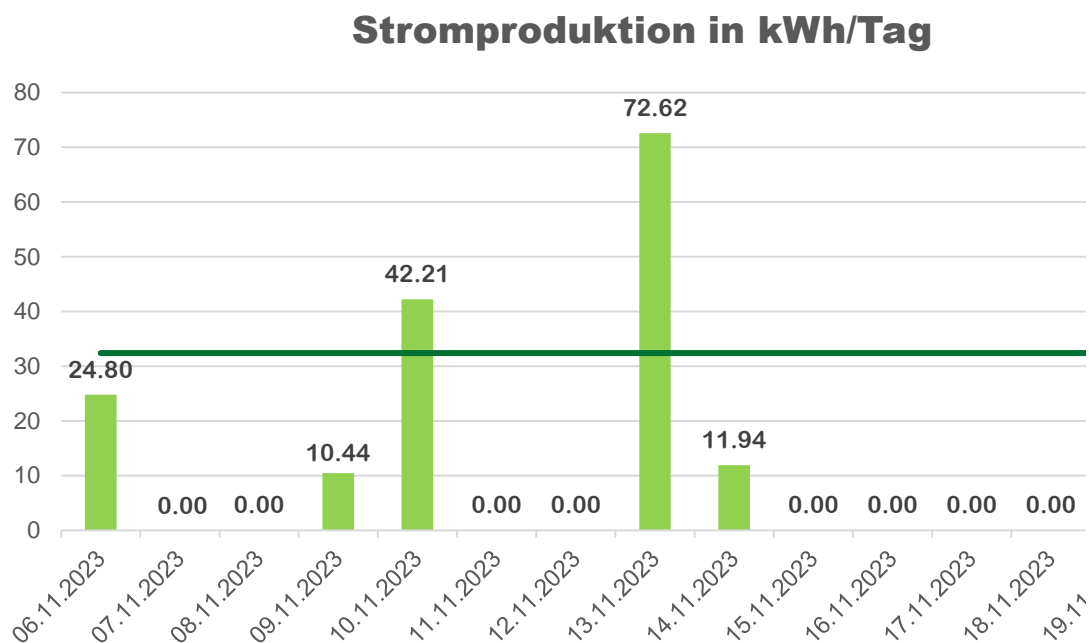


Abb. 22: Tägliche Stromproduktion der Firma Appel/Nemeton

Summe der Stromproduktion in kWh

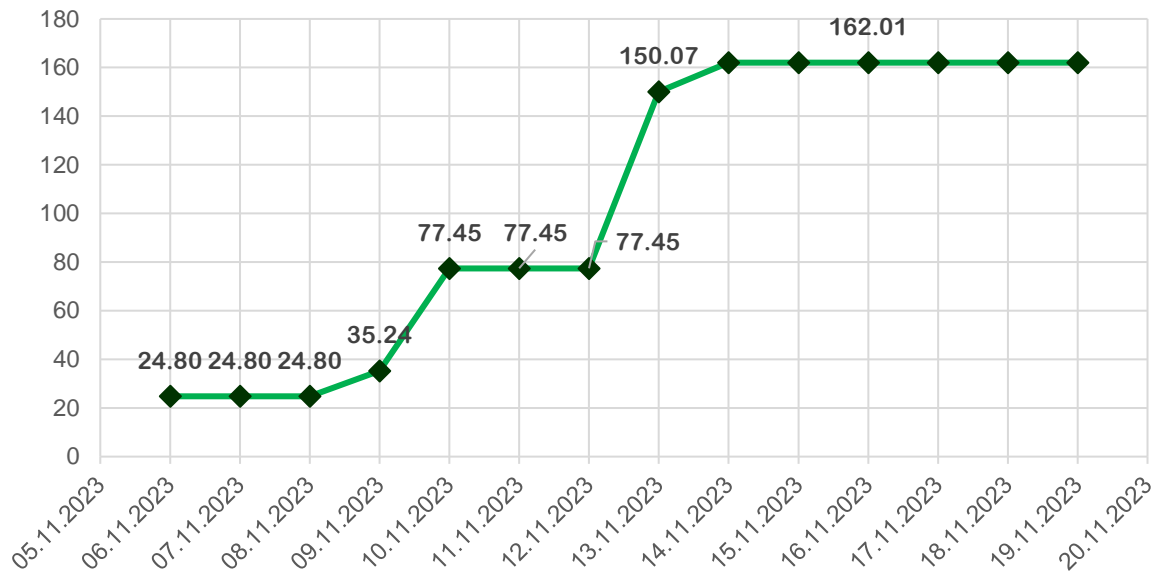


Abb. 23: Summierte Stromproduktion der Firma Appel/Nemeton

5. Leyrer und Graf

Beim letzten Testbetrieb erfolgte eine sehr intensive Testung des Wasserstoffgenerators, wodurch auch die Stromproduktion in diesen Tagen in Summe hoch war. Im Schnitt konnte mit Hilfe des H₂Genset pro Tag (an dem der Generator betrieben wurde) über 36,59 kWh Strom produziert werden (siehe **Abb. 24**).

Mit insgesamt 256,16 kWh produzierter elektrischer Energie (siehe **Abb. 25**) in 81,02 h Betriebszeit lag auch die Leistung der Stromproduktion, welche durch die vier Brennstoffzellen zur Verfügung gestellt werden konnte, mit 3,16 kW am höchsten. Die Gegenüberstellung von Stromproduktion der Brennstoffzellen und dem Wasserstoffverbrauch zeigt, dass für die Erzeugung von insgesamt 256,16 kWh Strom etwa 14,92 kg Wasserstoff nötig waren.

Bei diesem Testbetrieb (mit zwei Flaschenbündel) konnte der tatsächliche Druck abgelesen werden, welcher zum Start des Testbetriebes 274,63 bar und beim Wechseln auf das zweite Flaschenbündel 39,55 bar betrug. Das zweite Flaschenbündel erreichte beim Anschluss einen Druck von 275,2 bar und zu Ende des Testbetriebs herrschten noch 120,10 bar in dem Bündel. Dies entspricht umgerechnet nun etwa 17,17 kWh_{el}/kg Wasserstoff oder 0,058 kg Wasserstoff/kWh_{el}. **Der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen beläuft sich beim Testbetrieb der Firma Leyrer und Graf auf 52 %.**

Stromproduktion in kWh/Tag

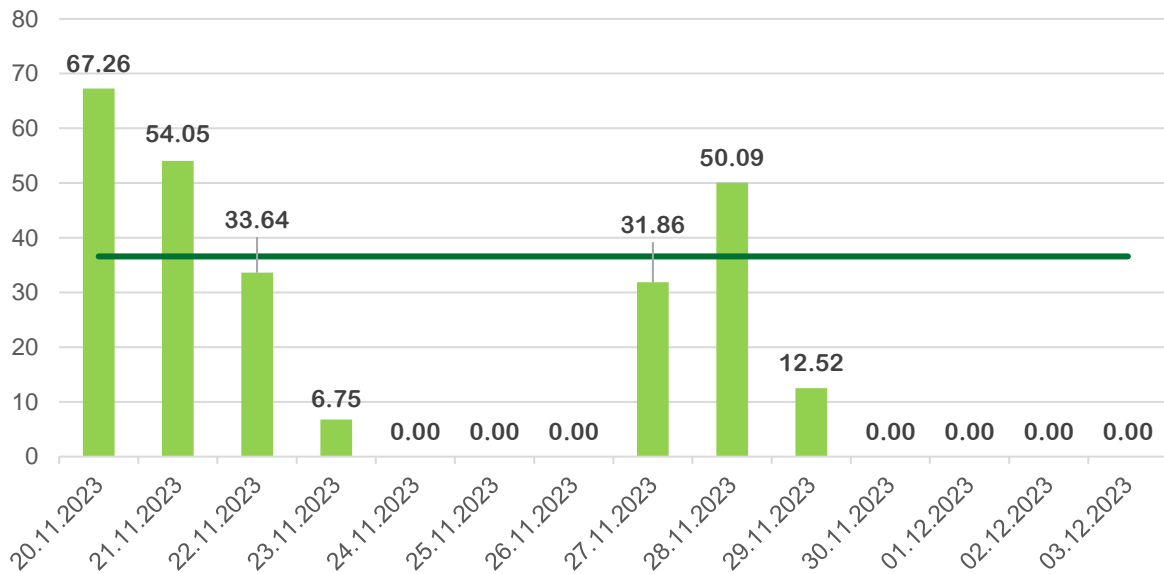


Abb. 24: Tägliche Stromproduktion der Firma Leyrer und Graf

Summe der Stromproduktion in kWh

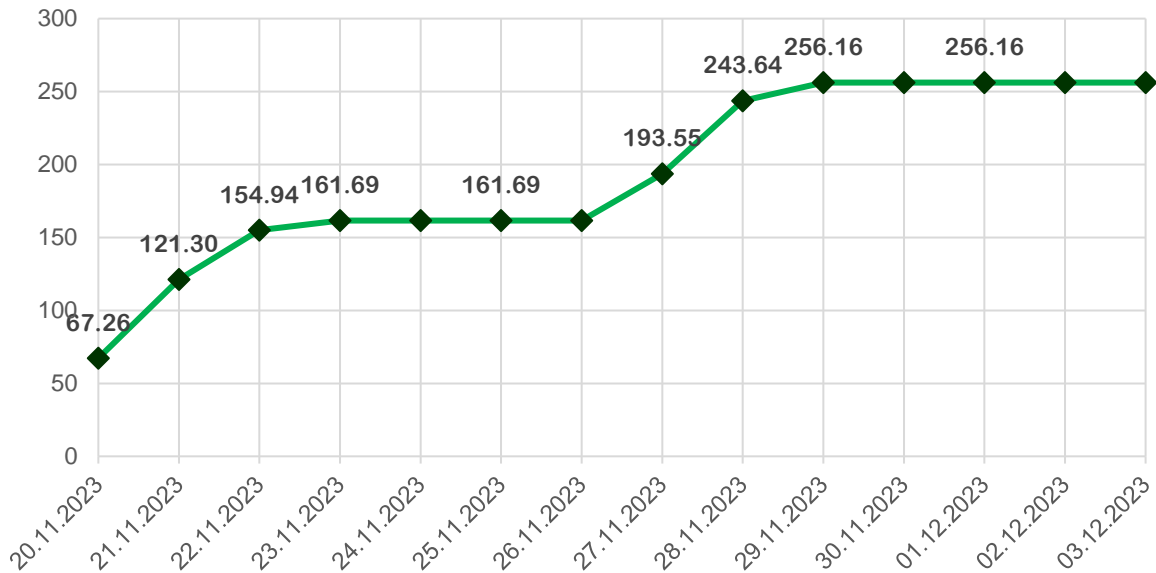


Abb. 25: Summierte Stromproduktion der Firma Appel/Nemeton

Wirkungsgrad

Wirkungsgrade der Brennstoffzellen

Die (Teil-)Wirkungsgrade der Brennstoffzellen sind in **Tab. 2** noch einmal zusammengefasst dargestellt. Diese Wirkungsgrade stellen die erzeugte Energiemenge (Gleichstrom) der Brennstoffzellen dem Brennwert des verbrauchten Wasserstoffs gegenüber.

Tab. 2: Wirkungsgrade der Brennstoffzellen aller Testbetriebe

Testbetrieb	Wirkungsgrad der Brennstoffzelle
Gebrüder Haider&Co	44 %
Hengl	50 %
STRABAG/Züblin	51 %
Appel/Nemeton	55 %
Leyer+Graf	52 %
Durchschnitt über alle Testbetriebe	50,49 %
Durchschnittlicher Wirkungsgrad	49,50 %

Wirkungsgrad des Systems Batterie + Wechselrichter

Der zweite (Teil-)Wirkungsgrad, welcher im Stromerzeugungsprozess des H₂Gensets von Relevanz ist, ist jener des Systems Batterie + Wechselrichter. Der Wirkungsgrad berechnet sich über das Verhältnis der erzeugten elektrischen Energie der Brennstoffzellen und des aufgezeichneten Stromverbrauchs der einzelnen Testbetriebe (die Differenz ergibt sich zu einem Großteil durch den Eigenverbrauch des Wechselrichters). Werden diese zwei Werte für alle fünf Testbetriebe gegenübergestellt, so ergeben sich folgende Wirkungsgrade gemäß **Tab. 3**.

Tab. 3: Wirkungsgrade des Systems Batterie + Wechselrichter aller Testbetriebe

Testbetrieb	Wirkungsgrad des Wechselrichters
Gebrüder Haider&Co	32 %
Hengl	28 %
STRABAG/Züblin	49 %
Appel/Nemeton	76 %
Leyer+Graf	67 %
Durchschnitt aller Testbetriebe	50,53%
Durchschnittlicher Wirkungsgrad	48,31%

Auffällig hierbei sind die starken Schwankungen im Wirkungsgrad, welche vermutlich durch die unterschiedliche Auslastung des Generators und damit ein unterschiedlich starkes (anteiliges) Durchschlagen des Eigenverbrauch des Wechselrichters zustande kommen.

Gesamtwirkungsgrade

Der Gesamtwirkungsgrad des H₂Genset ergibt sich durch Multiplikation des Wirkungsgrades der Brennstoffzellen und des Wirkungsgrades der Batterie. Die daraus folgenden Werte für alle Testbetriebe, sowie ein Durchschnittswert sind in **Tab 4** zu finden.

Tab. 4: Wirkungsgrade des gesamten Systems

Testbetrieb	Wirkungsgrad des gesamten System
Gebrüder Haider&Co	14 %
Hengl	14 %
STRABAG/Züblin	25 %
Appel/Nemeton	42 %
Leyer+Graf	35 %
Durchschnitt aller Testbetriebe	26,05%
Durchschnittlicher Wirkungsgrad	23,91%

Tatsächlicher Energieertrag des Wasserstoffs im H2Genset

Schließlich wird der Strom, welcher tatsächlich bei den Endverbrauchern angelangt ist, dem Wasserstoffverbrauch gegenübergestellt. Dieser Wert stellt den realen Wasserstoffverbrauch pro kWh nutzbarer elektrischer Energie dar.

Für alle Testbetriebe wurde der spezifische Wasserstoffverbrauch in kg H₂/kWh_{el} berechnet. Die entsprechenden Werte sowie Durchschnittswerte über alle Testbetriebe sind in **Tab 5** zu finden.

Tab. 5: spezifischer Wasserstoffverbrauch aller Testbetriebe

Testbetrieb	Wasserstoffverbrauch in kg H ₂ /kWh
Gebrüder Haider&Co	0,21
Hengl	0,22
STRABAG/Züblin	0,12
Appel/Nemeton	0,07
Leyer+Graf	0,09
Durchschnitt aller Testbetriebe	0,14

Die beiden letzten Testbetriebe waren somit mit einem Wasserstoffverbrauch mit 0,07-0,09 kg/kWh die effizientesten. Diese Auswertung zeigt, dass durch den H₂Genset aus dem Wasserstoff etwas über ein Viertel (8,65 kWh real nutzbarer Strom, zu 33 kWh Brennwert) der theoretisch zur Verfügung stehenden Energie gewonnen werden konnte.

CO₂-Emissionen

Dieseldiesgeneratoren

Die Verbrennung eines Liter Diesels verursacht 3,25 kg CO₂eq (2,64 kg direkt durch den Verbrennungsprozess, der Rest im Zuge der Herstellung¹ – davon hauptsächlich durch die Raffinerie-Prozesse)

¹ Quelle: Österreichisches Umweltbundesamt

CO₂-Bilanz der verschiedenen „Farben“ von Wasserstoff²

Grüner Wasserstoff darf per EU-Regulation maximal 3,38 kg CO₂eq/kg H₂ verursachen³. Die schweizer NPO „Green Hydrogen Organisation“ fordert 1 kg CO₂eq/kg H₂ als Obergrenze⁴.

Das österreichische Umweltbundesamt beziffert die CO₂-Bilanz von grauem Wasserstoff mit 0,32 kg CO₂eq/kWh, was 10,56 kg CO₂eq/kg H₂ entspricht und die von grünem Wasserstoff mit 0,02 kg CO₂eq/kWh, was 0,66 kg CO₂eq/kg H₂ entspricht⁵. Allerdings ist nicht eindeutig ablesbar, ob bei dieser Bilanz nur der Strom oder auch Scope 3 berücksichtigt wird.

Das deutsche Umweltbundesamt gibt den Wert von 16,1 kg CO₂eq/kg grauem H₂, 13,0 kg CO₂eq/kg blauem H₂, 11,5 kg CO₂eq/kg türkischem H₂ und 1,5 - 6,0 kg CO₂eq/kg grünem H₂ an. Die höheren Werte erklären sich mit einem ungünstigeren Energiemix in Deutschland sowie möglicherweise unvollständigen Systemgrenzen bei der Berechnung des österreichischen Umweltbundesamtes. Aufgrund der besseren und verlässlicheren Datenlage wird im Folgenden mit den deutschen Werten gerechnet.

Tab. 6: Zusammenfassung der CO₂-Bilanzen von Wasserstoff nach Herstellungsart

Herstellung	kg CO ₂ eq/kg H ₂
Grün	1,5 - 6,0
Türkis	11,5
Blau	13,0
Grau	16,1

Fazit

Feedback der Firmen

Bei der Bedienung des Gensets waren die einzigen Herausforderungen das manuelle Laden nach dem Leerfahren eines Gaspakets und die fehlende direkte Ablesbarkeit der Leistungsdaten am Gerät. Im Allgemeinen wurde die Bedienung nach einer umfassenden Einschulung als einfach empfunden, jedoch gab es einige Herausforderungen wie das Zuleitungskabel auf dem Boden.

Gebrüder Haider & CO: Der Testbetrieb verlief reibungslos, wobei die Kombination mit einer PV-Anlage als positiv herausstach. Die Learnings umfassten einfache Bedienung und geringe Geräuschkentwicklung, jedoch mit Wartezeiten beim Nachfüllen. Zukünftige Einsatzmöglichkeiten sehen sie in Projekten ohne Stromanschluss, auf Inseln und im Leitungsbau.

Appel/Nemeton: Die Unternehmen berichteten über einen hohen Wasserstoffverbrauch des H₂Gensets, technische Zuverlässigkeit und konstante Stromerzeugung. Dennoch sehen sie die Anwendung derzeit als unrealisierbar für ihre Bedürfnisse. Die Resonanz im Unternehmen zum Testbetrieb war eher gering, und der Zugang zu Wasserstoff wird in Zukunft bei entsprechender Wirtschaftlichkeit interessanter.

Leyrer+Graf: Der Betrieb des H₂Gensets war nahezu lautlos, aber die Leistungsfähigkeit war geringer als erwartet. Zukünftige Einsatzmöglichkeiten sieht das Unternehmen in innerstädtischen

² H₂ ist ein farbloses Gas; gemeint sind hier die Arten der Herkunft gem. gängiger einheitlicher Definition, zu finden z.B. unter <https://www.ewe.com/de/zukunft-gestalten/wasserstoff/die-farben-des-wasserstoffs>

³ [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI\(2023\)747085_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747085/EPRS_BRI(2023)747085_EN.pdf)

⁴ <https://gh2.org/blog/hydrogen-standards-should-only-lend-credibility-truly-emissions-busting-projects>

⁵ <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0763.pdf>

Baustellen, wo geringe Lärm- und Geruchsentwicklung gefordert ist. Die Kaufentscheidung hängt von der Leistungsfähigkeit, Logistik und den Kosten ab. Wasserstoff wird als „interessante Alternative“ für die Nachhaltigkeitsstrategie betrachtet.

Hengl: Das H2Genset reichte nicht für die benötigte elektrische Leistung am Steinbruch aus. Dennoch sehen sie den Einsatz als Mietvariante für kurzfristige Einsätze auf Baustellen und Veranstaltungen als realistisch. Langfristig planen sie H2 als Dieselerersatz in der LKW-Mobilität zu integrieren.

STRABAG/Züblin: Der Testbetrieb lieferte Einblicke in den Umgang mit Wasserstoff, wobei die örtlichen Behörden noch unsicher sind. Zukünftige Einsatzmöglichkeiten hängen von behördlichen Vorgaben ab, wobei auch der große Platzbedarf ein Hindernis darstellt. Aktuell sieht das Unternehmen den Kauf kritisch, da die Aggregate zu groß, teuer und unter Vollast nicht geräuschlos sind. Wasserstoff wird „ohne dezidierte Anstrengungen“ in der Gesamtstrategie beobachtet.

Abb. 26 und 27 zeigen die Ergebnisse des Befragungsbogens bei Projektende wieder. Es wird ersichtlich, dass die Zufriedenheit mit dem Gerät insgesamt gut war, eine höhere Leistung erwünscht gewesen wäre sowie die Wirtschaftlichkeit des Produkts bzw. der Technologie (derzeit) nicht gegeben ist.

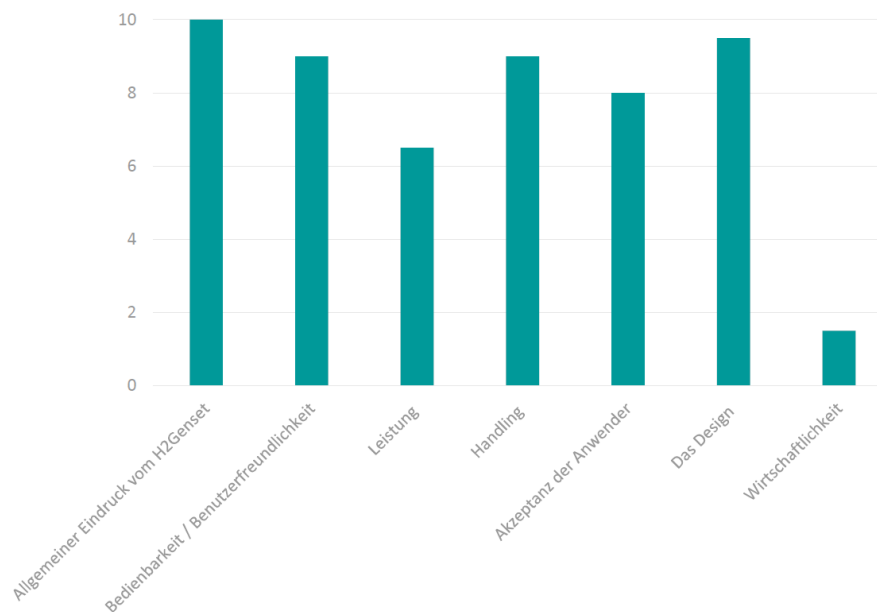


Abb. 26: Bewertungen der betrachteten Aspekte

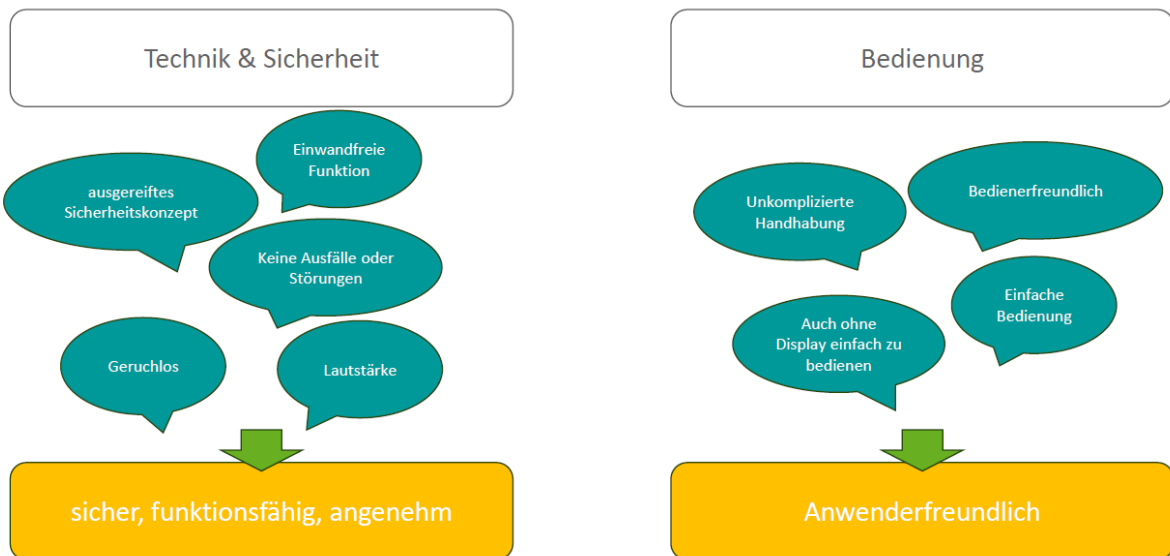


Abb. 17: Feedback der der Baufirmen zur Technik & Sicherheit sowie Bedienung des H₂Genset

Vergleich mit Dieselgeneratoren

Ein herkömmlicher Dieselgenerator, wie er auf vielen Baustellen zur Eigenstromerzeugung genutzt wird, hat einen Wirkungsgrad von 30-40%. Die Wirkungsgrade der Firmen Appel/Nemeton (ca. 42%) und Leyrer+Graf (ca. 35%) konnten diesen Wirkungsgrad erreichen. Bei den anderen Testbetrieben war der Wirkungsgrad unterhalb dem eines Dieselgenerators (niedrigster Wert ca. 14%). Daraus wird geschlossen, dass diese Technologie (seitens der Effizienz) zum jetzigen Stand nur dann auf Augenhöhe mit herkömmlichen Stromaggregaten ist, wenn die Auslastung sehr hoch ist.