

# **HYDROGEN TRYOUT AREAL (HYTRA)**

**Whitepaper  
zum wasserstoffbasierten  
Microgrid-Demonstrator**



Whitepaper  
zum wasserstoffbasierten  
Microgrid-Demonstrator

Im Rahmen des Projekts

**HYDROGEN TRYOUT AREAL (HYTRA)**

**Förderkennzeichen:** 67EXI5556 (BMUV Exportinitiative Umweltschutz)

**Projektlaufzeit:** 01.12.2021 – 30.06.2025

**Projektpartner:**

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Reichenhainer Str. 88

09126 Chemnitz

Texulting GmbH

Düsseldorfer Platz

09111 Chemnitz

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit  
und Verbraucherschutz



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	5
2	Demonstrator-Konzept und Umsetzung.....	6
3	Betriebsergebnisse.....	10
4	Projektergebnisse und Auswirkungen.....	12
6	Rahmenbedingungen für den industriellen Einsatz.....	17
7	Fazit und Ausblick.....	19



## EXECUTIVE SUMMARY

Das Verbundprojekt HyTrA (Hydrogen Tryout Areal) hat erfolgreich ein autarkes, modulares Microgrid-System entwickelt und in Südafrika demonstriert. Kern des Systems ist ein containerbasiertes Energienetz, das Photovoltaik, Batteriespeicher, Wasserstoff-Elektrolyse und Brennstoffzellentechnologie intelligent kombiniert, um eine zuverlässige, CO<sub>2</sub>-neutrale Stromversorgung sicherzustellen. Überschüssiger Solarstrom wird mittels Elektrolyse in Form von Wasserstoff gespeichert und bei Bedarf in einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt, sodass auch nachts und bei Netzausfällen eine kontinuierliche Versorgung gewährleistet ist. Eine digitale Steuerungsplattform mit Sensoren und Fernzugriff ermöglicht die effiziente Überwachung und Regelung aller Komponenten in Echtzeit, was die Betriebsführung optimiert und die Ausfallsicherheit erhöht.

Im Juni 2023 wurde der Demonstrator unter realen Bedingungen am Standort des Industriepartners Alu-Cab in Kapstadt in Betrieb genommen. In einem Workshop mit VertreterInnen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft präsentierte das Konsortium die Anlage und führte sie erfolgreich vor. Langzeittests vor Ort bestätigen die Zuverlässigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Systems im Dauerbetrieb. Die Zusammenarbeit mit lokalen Partnern – etwa der Universität Stellenbosch – und die Einbindung von Studierenden haben zusätzlich den Wissenstransfer und Kapazitätsaufbau unterstützt.

Der HyTrA-Demonstrator belegt eindrucksvoll, dass grüne Wasserstofftechnologie und Microgrids eine praktikable Alternative zu Dieselgeneratoren in Regionen mit instabiler Stromversorgung darstellen. Das Projekt leistet damit einen Beitrag zu Klimaschutz und nachhaltiger Entwicklung und ebnet den Weg für eine skalierbare industrielle Anwendung. Angesichts des beträchtlichen Marktpotenzials – von Gewerbebetrieben über Industrieparks bis zu netzfernen Gemeinden – bildet HyTrA die Grundlage für den Transfer der Technologie in größerem Maßstab und weitere Forschung und Entwicklung in diesem Feld.



# 1 EINLEITUNG

Zuverlässige Energie ist Grundvoraussetzung für wirtschaftliche Entwicklung, doch in vielen Regionen der Welt ist die Stromversorgung instabil oder unzugänglich. In Südafrika etwa führen regelmäßige Netzabschaltungen (*Load Shedding*) dazu, dass Unternehmen häufig auf Dieselgeneratoren zurückgreifen müssen. Dies ist nicht nur kostspielig, sondern verursacht erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen und Luftschadstoffe. Wasserstoff-Microgrids bieten hier eine vielversprechende Alternative: Sie ermöglichen eine lokale, vom öffentlichen Netz unabhängige Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien und eignen sich gleichzeitig zur Überbrückung längerer Versorgungsunterbrechungen.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Exportinitiative Umweltschutz (EXI) des Bundesumweltministeriums das Projekt "Hydrogen Tryout Areal (HyTrA)" gefördert. Ziel des Verbundvorhabens von Fraunhofer IWU und Texulting GmbH war es, ein kompaktes, robustes Microgrid-System zu entwickeln, das erneuerbare Überschussenergie in Form von grünem Wasserstoff zwischenspeichert und bei Bedarf wieder nutzbar macht. Dieses System sollte in Südafrika – einem Zielland der EXI-Förderung – unter realen Bedingungen demonstriert werden, um den Transfer deutscher Umwelttechnologie zu unterstützen und eine nachhaltige Infrastruktur für Regionen mit unzuverlässiger Stromversorgung aufzubauen. Das Projekt wurde in enger Kooperation mit lokalen Partnern (u.a. dem Unternehmen Alu-Cab in Kapstadt sowie wissenschaftlichen Einrichtungen vor Ort) umgesetzt, um sicherzustellen, dass die Lösung an die regionalen Bedürfnisse und Bedingungen angepasst ist. Insbesondere galt es, den hohen solaren Potenzialen Südafrikas Rechnung zu tragen und das System für das dortige Klima und Marktumfeld auszulegen.

Dieses Whitepaper fasst die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem HyTrA-Projekt zusammen. Es beschreibt das Demonstratorkonzept und dessen Umsetzung (Kapitel 2), präsentiert die betrieblichen Ergebnisse (Kapitel 3) sowie die erzielten Projektwirkungen (Kapitel 4). Darüber hinaus werden die Möglichkeiten einer industriellen Skalierung und Übertragbarkeit der Lösung erörtert (Kapitel 5) und die notwendigen Rahmenbedingungen für einen industriellen Einsatz solcher Systeme diskutiert (Kapitel 6). Abschließend gibt Kapitel 7 einen Ausblick auf kommende Schritte und Perspektiven. Damit dient dieses Dokument sowohl als Nachweis der erfolgreichen Demonstration für Fördergeber (NOW/ZUG) als auch als Information für interessierte Fachkreise und die Öffentlichkeit, wie das HyTrA-System in Zukunft zur Dekarbonisierung und Versorgungssicherheit beitragen kann.



## 2 DEMONSTRATOR-KONZEPT UND UMSETZUNG

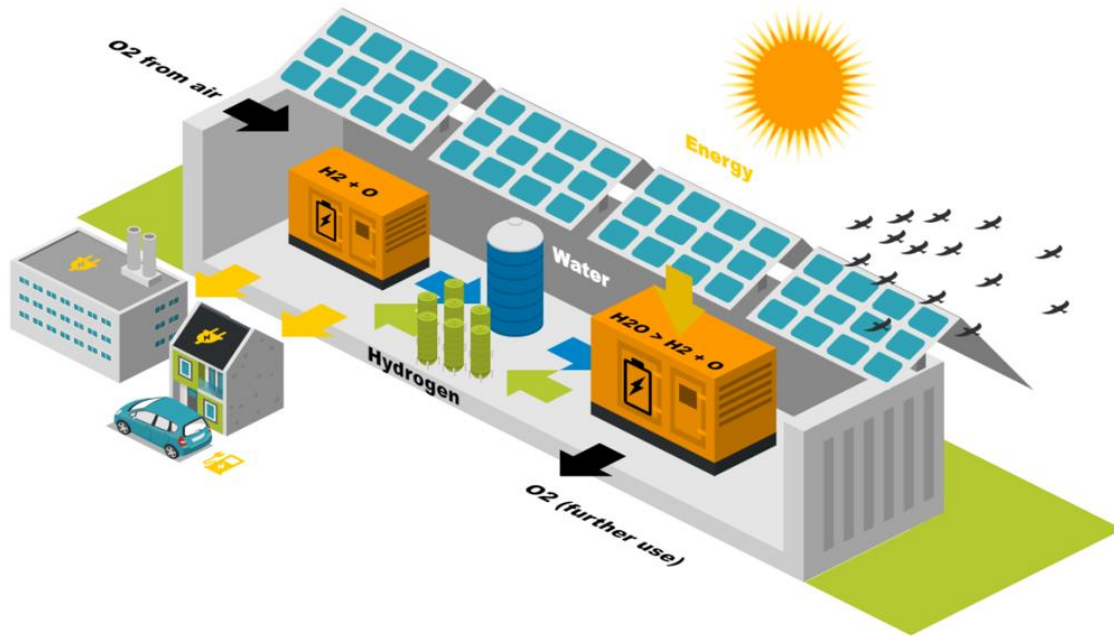


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des HyTrA-Microgrids mit seinen Hauptkomponenten für Erzeugung, Speicherung und Verbrauch

Das HyTrA-System integriert alle erforderlichen Elemente eines Energiesystems (**Erzeuger, Speicher und Verbraucher**) in einem einzigen mobilen Modul. Als Gehäuse dient ein standardisierter **Schiffscontainer**, der die Technik beherbergt und sich einfach transportieren lässt. Auf dem Containerdach kann eine **Photovoltaikanlage** installiert werden, welche die einfallende Sonnenenergie in elektrischen Strom umwandelt. Dieser Solarstrom treibt einen **Elektrolyseur** an, der aus entmineralisiertem Wasser Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) erzeugt. Der produzierte grüne Wasserstoff wird verdichtet und in einem Bündel aus Hochdruck-Gasflaschen im Container zwischengespeichert. Sobald Strombedarf besteht, etwa abends oder bei bewölktem Himmel, wird der gespeicherte Wasserstoff einer **Brennstoffzelle** zugeführt, die mit Umgebungsluft (als Sauerstoffquelle) betrieben wird und daraus emissionsfrei wieder elektrische Energie erzeugt. Als einziges Reaktionsprodukt entsteht Wasser, das aufgefangen und dem Elektrolyseur wieder zugeführt wird, sodass ein **geschlossener Wasserkreislauf** entsteht. Dieses autarke Kreislaufsystem muss initial nur einmal befüllt werden und kommt im laufenden Betrieb ohne nennenswerte Nachspeisung von Frischwasser aus, was ein wichtiger Vorteil in wasserarmen Gegenden ist.



Der Demonstrator wurde auf eine elektrische Größenordnung im unteren zweistelligen kW-Bereich ausgelegt, passend zum Bedarf eines mittelständischen Betriebs. Die Hauptkomponenten haben folgende Kenndaten:

- ein **Elektrolyseur** mit ca. 10 kW elektrischer Aufnahme (aufgeteilt in vier Module à 2,5 kW),
- eine **PEM-Brennstoffzelle** mit 7,8 kW Nennleistung,
- ein Lithium-**Batteriespeicher** zur Kurzzeitspeicherung
- sowie eine Wasserstoff-**Speichereinheit** (18 Gasflaschen im Verbund) für Langzeitspeicherung.



Abbildung 2: Teilsysteme des Microgrid (v.l.): Elektrolyseur, Wasserstoff-Speicher und Leistungselektronik

Sämtliche Leistungselektronik und Steuerungskomponenten sind ebenfalls im 40-Fuß-Container integriert. Die modularisierte Konstruktion ermöglicht es, Komponenten relativ einfach auszutauschen oder in zukünftigen Ausbaustufen zu vergrößern, beispielsweise könnten für größere Anwendungen ein leistungsstärkerer Elektrolyseur oder zusätzliche PV-Module und Wasserstofftanks eingebaut werden. Somit ist das Konzept **skalierbar** angelegt, ohne in seinem Grundprinzip verändert werden zu müssen.

## DIGITALES ENERGIEMANAGEMENT

Um einen sicheren und optimierten Betrieb zu gewährleisten, wurde eine umfassende **Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR)** implementiert. Über ein zentrales **Monitoring-Dashboard** können alle relevanten Parameter des Microgrids in Echtzeit überwacht werden, von PV-Leistung und Batterieladestand über Elektrolyseur- und Brennstoffzellenstatus bis hin zu Umgebungsbedingungen. Verschiedene Sensoren sichern dabei den Betrieb ab: So werden z.B. die **Spannung und Ströme** der Brennstoffzelle kontinuierlich überwacht, um außerhalb zulässiger Bereiche sofort eingreifen zu können.

**Temperaturfühler** an kritischen Komponenten verhindern Überhitzungen, **Drucksensoren** kontrollieren den Wasserstoffkreislauf auf stabile Betriebsdrücke, und ein **Gasdetektor** spürt mögliche Wasserstoff-Leckagen in der Containerluft sofort auf, um im Ernstfall Alarm zu geben. Das Energiemanagement ist so programmiert, dass es automatisiert die **Lastflüsse optimiert**: Überschüssige PV-Energie wird vorrangig zum Laden der Batterie verwendet und darüber hinaus zur H<sub>2</sub>-Erzeugung; sinkt die Batteriekapazität unter definierte Schwellen, startet selbsttätig die Brennstoffzelle, um aus dem gespeicherten Wasserstoff Strom zu liefern. Über Fernzugriff können die Betreiber außerdem wichtige Aktionen manuell steuern – etwa den Elektrolyseur zu- oder abschalten oder die Brennstoffzelle aus der Ferne aktivieren. Die digitale Plattform hat sich bereits im Betrieb als zentrales **Werkzeug für effiziente Betriebsführung und Wartung** erwiesen, indem Abweichungen frühzeitig erkannt und Anpassungen schnell vorgenommen werden konnten.

## AUFBAU UND INSTALLATION

Nach Abschluss der Planungs- und Konstruktionsphase (Meilenstein 1) begann 2022 die Beschaffung der Komponenten. Aufgrund weltweiter Lieferkettenprobleme verzögerte sich die Fertigung einiger Schlüsselkomponenten; dennoch konnte Anfang 2023 mit dem Zusammenbau des Systems begonnen werden. Die Endmontage erfolgte bei einem Industriepartner in Euskirchen (Deutschland), wo im März 2023 eine erfolgreiche **Vorabnahme** stattfand. Dabei wurde das vollständige Microgrid erstmals in Betrieb gesetzt und auf Herz und Nieren getestet. Der **Funktionsnachweis** unter kontrollierten Bedingungen zeigte, dass alle Systeme wie vorgesehen zusammenarbeiten. Anschließend wurde das Microgrid für den Transport nach Südafrika vorbereitet: Die gesamte Anlage wurde im spezialgefertigten Container verstaut und per Seefracht nach Kapstadt verschickt. Während des Transports gab es unerwartete Verzögerungen bei der Zollabfertigung, und der Container erlitt leichte **Transportschäden** (vermutlich durch Seegang). Diese Schwierigkeiten konnten jedoch dank schneller Reaktion vor Ort gemeistert werden. Der Partner **Alu-Cab** in Kapstadt – zugleich der Demonstrationsanwender – übernahm umgehend die Instandsetzung des Containers und stellte sicher, dass alle Systeme unversehrt installiert werden konnten.

Im **Juni 2023** war es dann soweit: Ein erfahrenes Team aus Deutschland und Südafrika nahm das Microgrid am Alu-Cab-Werksstandort in Kapstadt offiziell in Betrieb. Bei diesem Anlass wurde ein Workshop veranstaltet, an dem Vertreter der Stadt Kapstadt, der Deutschen Auslandshandelskammer, Partnerunternehmen sowie Interessierte aus Politik und Wissenschaft teilnahmen. Die Teilnehmer konnten das laufende System in Augenschein nehmen und sich von dessen Leistungsfähigkeit überzeugen.





Abbildung 3: Offizielle Inbetriebnahme des HyTRA-Systems am Alu-Cab Standort in Kapstadt (Juni 2023). Lokale Partner, Behörden und Branchenvertreter begutachten den containerbasierten Demonstrator.

In den Wochen nach dem Start wurden weitere Optimierungen im Echtbetrieb vorgenommen, um das Zusammenspiel der Komponenten feinzustimmen. So konnte durch Anpassung der Lade-/Entladezyklen der Batterien und Verbesserung der Steuerungsalgorithmen die Effizienz nochmals gesteigert werden. Insgesamt zeigte die **Umsetzung des Demonstrators**, dass ein solches komplexes System innerhalb kurzer Zeit vor Ort installiert und erfolgreich hochgefahren werden kann – trotz logistischer Herausforderungen bei einem interkontinentalen Transfer. Der Betrieb am realen Industriestandort lieferte wertvolle Erkenntnisse für den Dauerbetrieb, die über Laborbedingungen hinausgehen.



### 3 BETRIEBSERGEBNISSE

Seit Inbetriebnahme Mitte 2023 läuft der HyTrA-Demonstrator in Kapstadt **stabil und zuverlässig**. Er versorgt einen wesentlichen Betriebsteil der Firma Alu-Cab vollständig mit erneuerbarem Strom und hat damit die öffentliche Netzversorgung in diesem Bereich praktisch ersetzt. Selbst während der in Südafrika häufig auftretenden **Netzabschaltungen (Load Shedding)** blieb die Stromversorgung bei Alu-Cab dank des Microgrids jederzeit aufrecht erhalten. Die Kombination aus Batteriespeicher und Wasserstoff konnte die zeitweisen Netzabschaltungen mühelos überbrücken, sodass die Produktion im Unternehmen ohne Unterbrechung weiterlief. Dieses Ergebnis belegt die **Versorgungssicherheit** und Resilienz des Systems unter realen Bedingungen.

Auch quantitativ zeigen sich deutliche Erfolge. Erste Auswertungen der Energiedaten ergaben, dass die **PV-Erzeugung über den Tagesverlauf den Verbrauch überstieg**, wobei Überschüsse in der Batterie und via Elektrolyse gespeichert wurden. So kann die überschüssige Solarenergie vom Tage nachts mittels Brennstoffzelle genutzt werden, wodurch der Standort *rund um die Uhr autark* betrieben wird. Der konsequente Einsatz von grünem Wasserstoff und Solarstrom führt zu einer erheblichen **CO<sub>2</sub>-Reduktion**: Hochrechnungen zufolge vermeidet das HyTrA-System im Vergleich zum vorherigen Dieselgenerator-Betrieb des Pilotstandorts bis zu *50 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr*. Darüber hinaus werden lokal keine Schadstoffe mehr emittiert, **Ruß, Feinstaub und Stickoxide** aus Dieselaggregaten gehören der Vergangenheit an. Dies verbessert nicht nur die Klimabilanz des Betriebs, sondern auch die Luftqualität vor Ort.

Die **Performance-Daten** des Microgrids untermauern dessen Effizienz: Das intelligente Energiemanagement reagierte wie vorgesehen auf wechselnde Lasten. Beispielsweise wurde an Wochenenden mit geringerer Betriebslast automatisch weniger Wasserstoff verbraucht und der Elektrolyseur fuhr seine Produktion zurück, was den **Wasserstoffvorrat** für bedarfsintensivere Wochentage schonte. In Spitzenlastzeiten hingegen schaltete die Brennstoffzelle verzögerungsfrei zu und lieferte zusätzliche Leistung aus dem H<sub>2</sub>-Speicher. Dadurch konnte jederzeit ein konstanter Spannungs- und Stromfluss im internen Netz sichergestellt werden. Die Fernüberwachung erwies sich als sehr hilfreich: Kleinere Abweichungen oder Ineffizienzen im Betrieb (etwa ein etwas zu hoher nächtlicher Leerlaufverbrauch einzelner Komponenten) wurden vom Dashboard sofort erkannt. In Zusammenarbeit zwischen dem lokalen Technik-Team und den Experten in Deutschland konnten solche Punkte zeitnah analysiert und Optimierungsmaßnahmen eingeleitet werden. Insgesamt bestätigte der mehrmonatige Dauerbetrieb, dass das System **robust und wartungsarm** läuft. Weder bei den elektrochemischen Kernkomponenten (Elektrolyseur, Brennstoffzelle) noch bei den Hilfssystemen traten nennenswerte Störungen auf. Lediglich routinemäßige Inspektionen und Filterwechsel waren erforderlich, was die angestrebte **Wartungsfreiheit** weitgehend bestätigt.



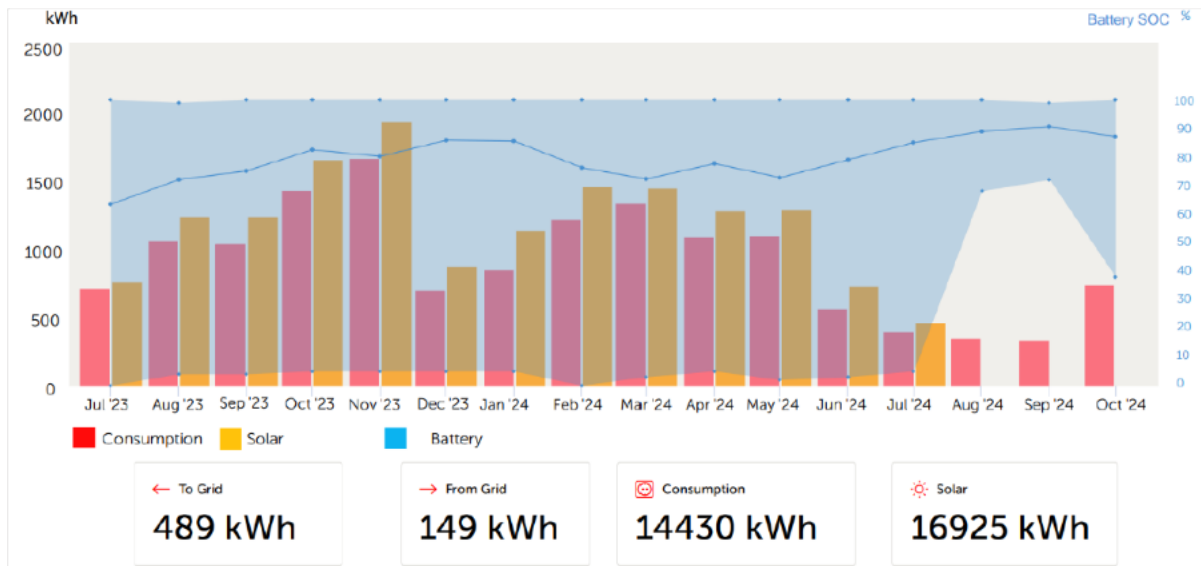


Abbildung 4: Leistung des Systems bis Oktober 2024

Auch **wirtschaftlich** zeigt der Demonstrator vielversprechende Resultate. Durch den Wegfall der Diesel-Verbrauchskosten und der deutlich geringeren Netzentnahme kann Alu-Cab bereits jetzt Energiekosten einsparen. Zwar stehen einer vollständigen Wirtschaftlichkeitsbewertung die hohen Anfangsinvestitionen gegenüber, doch konnte im Projektverlauf demonstriert werden, dass sich die Betriebskosten dank des effizienten Lastmanagements minimieren lassen. Zudem profitiert Alu-Cab indirekt von der erhöhten Versorgungssicherheit: Produktionsausfälle durch Stromausfall – zuvor ein ernstzunehmendes Risiko – traten seit Einsatz von HyTrA nicht mehr auf. Dies stärkt die Produktivität und Planbarkeit im Betrieb.

Zusammenfassend liefern die Betriebsergebnisse den **Beweis des Konzeptes** (*Proof of Concept*): Das HyTrA-Microgrid erfüllt seine Aufgabe, eine **100% erneuerbare, unterbrechungsfreie Energieversorgung** bereitzustellen, vollumfänglich. Die positiven Umwelteffekte (Einsparung von Treibhausgasen und Schadstoffen) gehen Hand in Hand mit technischen Vorteilen (Netzstabilität, Resilienz) und operativen Nutzen (kontinuierlicher Betrieb ohne Ausfälle). Diese Resultate bilden die Grundlage, um das Konzept weiter zu verbreiten und für größere Maßstäbe zu adaptieren.



## 4 PROJEKTERGEBNISSE UND AUSWIRKUNGEN

Über die reinen Betriebskennzahlen hinaus hat das Projekt HyTrA vielfältige **Auswirkungen und Mehrwerte** erzielt. Als **Modellprojekt** im Rahmen der Exportinitiative Umweltschutz demonstriert HyTrA eindrucksvoll, wie **nachhaltige Energieinfrastrukturen in einem internationalen Kontext** aufgebaut werden können. Es dient damit als Referenz, wie deutsche grüne Wasserstoff-Technologie in strukturschwachen Regionen erfolgreich implementiert werden kann – im Sinne eines Vorreiters für den weltweiten Klimaschutz. Konkret leistet HyTrA Beiträge zu mehreren Zielen für nachhaltige Entwicklung (SDGs): Die Bereitstellung *bezahlbarer und sauberer Energie* (SDG 7) in einer vormals fossilen Umgebung, die *Förderung nachhaltiger Industrieinnovationen* (SDG 9) durch eine neuartige Microgrid-Lösung, die Unterstützung *nachhaltiger Gemeinden* (SDG 11) mittels verbesserter lokaler Infrastruktur sowie der *Klimaschutz* (SDG 13) durch CO<sub>2</sub>-Reduktion. Zudem steht das Projekt exemplarisch für *globale Partnerschaften* (SDG 17): Die enge Zusammenarbeit zwischen deutschen und südafrikanischen Akteuren – von Unternehmen über Universitäten bis zu Behörden – hat gezeigt, wie gemeinsame Umweltprojekte grenzüberschreitend erfolgreich umgesetzt werden können.

Ein wesentliches Ergebnis liegt im Bereich **Wissens- und Technologietransfer**. Durch die Demonstration vor Ort konnten lokale Fachkräfte und Entscheider direkt mit der neuen Technologie vertraut gemacht werden. Im Rahmen des Workshops zur Inbetriebnahme in Kapstadt erhielten Vertreter der Stadtverwaltung, der Wirtschaft und Bildungseinrichtungen einen praxisnahen Einblick in die Funktionsweise des Microgrids. Dieses *sichtbare Beispiel* hat vor Ort für erhebliches Interesse gesorgt und Diskussionen über weitere Anwendungen ausgelöst. Parallel dazu wurden im Projekt gezielt **Bildungs- und Forschungseinrichtungen** eingebunden. So arbeitete das Team eng mit der **Universität Stellenbosch** zusammen, um Betriebsdaten wissenschaftlich auszuwerten und in Studienprojekten zu nutzen. Mehrere südafrikanische Studierende konnten im Rahmen von Abschlussarbeiten oder Praktika an HyTrA mitwirken und so wertvolle Erfahrungen im Bereich Wasserstofftechnologie sammeln. Diese Form des Kapazitätsaufbaus erhöht die lokale Kompetenz und schafft die Grundlage für eine eigenständige Weiterführung der entwickelten Ansätze durch südafrikanische Partner in der Zukunft.

Auch ein **Design-Thinking-Projekt** mit Fokus auf ländliche Energieversorgung wurde initiiert: In Kooperation mit der D-School des Hasso-Plattner-Instituts in Kapstadt hat HyTrA eine Challenge für Studierende betreut. Unter der Leitfrage „*Wie können wir Technologie nutzen, um den Zugang zu sauberer Energie für ländliche Gemeinschaften zu verbessern?*“ entwickelten vier studentische Teams über zehn Wochen innovative Lösungsideen. Die Studierenden identifizierten u.a. den Mangel an Schulungen und Informationen als Hürden für die Einführung neuer Energiesysteme auf dem Land. Daraus entstanden Prototyp-Konzepte wie z.B. ein kombiniertes Wind-Wasser-Kraft-System zur Bewässerung oder ein Schulungsprogramm für Landarbeiter. Die Ergebnisse flossen nicht direkt in den HyTrA-Demonstrator ein, haben aber das **Bewusstsein für wichtige weiche Faktoren** geschärft – etwa die Bedeutung von Benutzerfreundlichkeit, Training und Community-Einbindung bei der Verbreitung neuer Technologien. Solche Initiativen unterstreichen den **ganzheitlichen Ansatz** des Projekts, der technische Innovation mit sozialer Innovation verknüpft.





Abbildung 5: Ergebnisvorstellung Design-Thinking-Challenge Kapstadt 2024

Die **Resonanz in der Fachwelt** war ebenfalls positiv. Das HyTrA-Konsortium präsentierte das Projekt und erste Ergebnisse auf mehreren renommierten Veranstaltungen, darunter der Hannover Messe 2023 und der Green Hydrogen Conference. Zudem wurden Fachartikel in Publikationen wie dem Fraunhofer-Magazin und der Zeitschrift *SmarterWorld* veröffentlicht, die das Konzept einem breiten Publikum näherbrachten. Digitale Kanäle (Projektwebseite <https://www.energridly.com>, Social-Media-Posts) sowie Pressemitteilungen über die NOW GmbH und die Exportinitiative Umweltschutz erhöhten die Sichtbarkeit weiter. Besonders hervorzuheben ist ein Beitrag des Industriepartners Alu-Cab selbst: In einem Blogartikel *“Reflecting on a year of HyTra”* zog das Unternehmen ein begeistertes Resümee nach einem Jahr Betrieb. Darin wird HyTrA als *“Beacon of Innovation”* bezeichnet, das Alu-Cab geholfen hat, seine Abhängigkeit vom öffentlichen Netz drastisch zu reduzieren und Emissionen einzusparen. Die Tatsache, dass ein Endanwender die Technologie so positiv bewertet und öffentlich darüber berichtet, ist ein starkes Signal für die **Marktakzeptanz** und das Interesse in der Industrie.

Nicht zuletzt fördert HyTrA auch die **Netzwerkbildung** zwischen relevanten Stakeholdern. Im Projektkonsortium arbeiteten Vertreter aus Forschung, KMU und Anwenderhand in zwei Ländern eng zusammen – ein Netzwerk, das über das Projektende hinaus Bestand hat. Dies erleichtert zukünftige Kooperationen und Folgeprojekte. So haben die Partner bereits das Anschlussvorhaben **HygO** in Namibia angestoßen, das auf den HyTrA-Erfahrungen aufbaut und zusätzlich die Nutzung des bei der Elektrolyse anfallenden Sauerstoffs für Wasseraufbereitung demonstrieren soll. Insgesamt hat HyTrA somit **Strukturen geschaffen**, die eine Verstetigung und Weiterentwicklung der entwickelten Lösungen ermöglichen (*Verstetigung der Vorhabenergebnisse*). Das im Projekt entstandene *verwertungsfähige Produkt* – ein getestetes Microgrid-System – wird über die Projektwebsite und Veranstaltungen aktiv beworben, um weitere Anwender und Investoren zu gewinnen. Damit leistet HyTrA weit mehr als nur einen einmaligen Demonstrationsbeweis: Es stößt einen Prozess an, der die Dekarbonisierung industrieller Energiesysteme international voranbringen kann.



## 5 INDUSTRIELLE SKALIERBARKEIT UND ÜBERTRAGBARKEIT

Ein zentrales Anliegen von HyTrA war es, eine Lösung zu entwickeln, die **über den Pilotbetrieb hinaus** in größerem Maßstab einsetzbar ist. Tatsächlich zeigt das Projekt, dass wasserstoffbasierte Microgrids **hochgradig skalierbar und flexibel** ausgelegt werden können. Die grundlegende Systemarchitektur – PV + Batterie + Elektrolyse + H<sub>2</sub>-Speicher + Brennstoffzelle – lässt sich auf verschiedene Leistungsbereiche und Anwendungen übertragen. Von der **autarken Energieversorgung kleiner Gemeinden** bis hin zur **Unterstützung großer Industrieanlagen** kann das Konzept prinzipiell skaliert werden. Diese Vielseitigkeit macht Microgrids mit Wasserstoff zu einer attraktiven Option für unterschiedlichste Branchen und Regionen.

Bereits der HyTrA-Demonstrator selbst ist modular aufgebaut, sodass Komponenten für größere Leistungen einfach dimensioniert werden könnten. Wenn zum Beispiel mehr elektrische Leistung gefordert ist, lässt sich ein größerer oder zusätzlicher Elektrolyseur integrieren; bei höherem Wasserstoffbedarf können mehr Speichertanks oder leistungstärkere Brennstoffzellen ergänzt werden. Ebenso kann die Photovoltaikfläche je nach Standort und Sonneneinstrahlung erweitert werden, um mehr Überschussstrom für die Wasserstoffproduktion bereitzustellen. Die **Modulbauweise** des Systems erlaubt diese Anpassungen ohne vollständige Neuentwicklung – ein wichtiges Kriterium für die industrielle Skalierung. Auch andere Erzeugungsarten wie **Windenergie** lassen sich bei Bedarf einbinden, da der Wasserstoffspeicher als Puffer für jegliche erneuerbare Überschussenergie fungieren kann. Damit eignet sich das Microgrid-Konzept nicht nur für sonnenreiche Regionen, sondern generell für Standorte mit verfügbaren erneuerbaren Energien.

Ein weiterer Aspekt der Übertragbarkeit ist die **Anpassungsfähigkeit an verschiedene Einsatzbedingungen**. Das HyTrA-System wurde speziell für die Anforderungen des afrikanischen Marktes konzipiert – also robuste Technik, hohe Hitzetoleranz (dauerhaft 50 °C im Container), einfache Bedienbarkeit und lange Lebensdauer. Diese Eigenschaften kommen aber gleichermaßen in anderen rauen Umgebungen zum Tragen, etwa in Wüstenregionen oder entlegenen Gebieten ohne Infrastruktur. Die im Projekt erreichte Lebensdauerprognose von über 60.000 Betriebsstunden (mehr als 10 Jahre) zeigt, dass solche Microgrids auch für **langfristigen industriellen Einsatz** ausgelegt werden können. Damit sie wirtschaftlich attraktiv werden, ist allerdings die **Kostendegression durch Serienfertigung** entscheidend. HyTrA hat bereits Ansätze aufgezeigt, wie durch Standardisierung und Skaleneffekte perspektivisch eine Kostenparität zu konventionellen (fossilen) Lösungen erreicht werden kann. Beispielsweise könnten bei einer größeren Stückzahl von Microgrid-Einheiten gemeinschaftliche Beschaffungen der Kernkomponenten oder lokale Fertigungen die Investitionskosten pro Einheit deutlich senken.



Die **Marktperspektiven** für skalierte Wasserstoff-Microgrids sind vielversprechend. Überall dort, wo Stromnetze unzuverlässig oder nicht vorhanden sind, besteht Bedarf an autonomen Versorgungssystemen – von **ländlichen Regionen** in Entwicklungs- und Schwellenländern bis hin zu **kritischen Infrastrukturen** (z.B. Krankenhäuser, Rechenzentren) selbst in Industrienationen. Für **Industrieparks und Gewerbegebiete** mit hohem Energieverbrauch könnten H<sub>2</sub>-Microgrids eine Möglichkeit sein, erneuerbare Energie lokal zu speichern und bei Lastspitzen zur Verfügung zu stellen. HyTrA hat gezeigt, dass ein solches System **transportabel** ist und relativ schnell an einem neuen Standort installiert werden kann. Damit wird auch der temporäre Einsatz vorstellbar – etwa um Baustellen, Minen oder abgelegene Projekte zeitlich begrenzt mit sauberem Strom zu versorgen. Durch gezielte Investitionen und strategische Partnerschaften kann das HyTrA-Konzept für diese Anwendungen weiterentwickelt und kommerzialisiert werden. Das Konsortium prüft bereits Anschlussmöglichkeiten, um das Microgrid **weltweit zum Einsatz** zu bringen: Kurzfristig sind Pilotprojekte in weiteren afrikanischen Ländern und in Südamerika im Gespräch, mittelfristig könnten auch in Asien und Europa entsprechende Systeme implementiert werden.

Natürlich gibt es bei der industriellen Skalierung auch **Herausforderungen**. Eine davon sind die derzeit noch hohen **Investitionskosten**, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU). Ohne Fördermittel oder innovative Finanzierungsmodelle (z.B. Energy-as-a-Service) ist die Anschaffung eines H<sub>2</sub>-Microgrids heute noch eine große Hürde. Hier wird die Entwicklung der nächsten Jahre entscheidend sein: Bei weiter steigenden Preisen für fossile Brennstoffe und sinkenden Kosten für Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Batterien dürfte sich die Wirtschaftlichkeit jedoch rasch verbessern. HyTrA liefert in diesem Kontext einen wichtigen Realitätscheck und datenbasierten Erfahrungswert, der Investoren und Entscheidern helfen kann, die Potenziale besser einzuschätzen. Eine weitere Herausforderung ist die **Standardisierung**: Damit Microgrids in großer Zahl eingesetzt werden können, sind einheitliche Schnittstellen, Normen und Zertifizierungen nötig. Durch HyTrA konnten bereits Learnings in die entsprechenden Gremien (z.B. VDE/DKE für Inselnetze, IEC-Normen für H<sub>2</sub>-Systeme) eingespeist werden, was langfristig die Marktfähigkeit solcher Systeme erhöht.

Zusammengefasst besitzt das HyTrA-Konzept alle notwendigen Eigenschaften, um übertragbar und skalierbar zu sein: **Modularität, Flexibilität** in der Auslegung und **Anpassbarkeit** an verschiedenste Szenarien. Die im Pilot gewonnenen Erkenntnisse fließen nun in die Planung größerer Systeme ein. Fraunhofer IWU hat etwa mit *HyGrid* bereits ein Folgekonstrukt definiert, das als „*Plug-and-Play-Lösung*“ je nach Bedarf von wenigen kW bis in den dreistelligen kW-Bereich skaliert werden kann – ideal für Anwendungen vom Handwerksbetrieb bis hin zu kleineren Fabriken. HyTrA hat hierfür den Weg bereitet und demonstriert, dass die Vision einer **dezentralen, grünen Energieversorgung** mittels Wasserstoff in die Realität umgesetzt werden kann.



## 6 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR DEN INDUSTRIELLEN EINSATZ

Für die breite industrielle Einführung von Wasserstoff-Microgrids sind neben der technischen Machbarkeit auch geeignete **Rahmenbedingungen** erforderlich. Eine entscheidende Rolle spielen hierbei die **regulatorischen Vorgaben** und Unterstützung seitens der Politik. Im HyTrA-Projekt zeigte sich zum Beispiel, dass die **Netzintegration** des Systems an Hürden scheiterte: Aus rechtlichen Gründen war es (noch) nicht möglich, überschüssigen Strom ins öffentliche Netz einzuspeisen, da entsprechende Vergütungsmodelle und Genehmigungen fehlten. Ohne wirtschaftliche Anreize für die Netzeinspeisung bleibt jedoch Potenzial ungenutzt – hier wäre es wünschenswert, wenn künftige Regulierung den Betrieb von Wasserstoffspeichern und Brennstoffzellen in Netzkopplung erleichtert (etwa durch **Einspeisetarife für grünen Überschussstrom** oder vereinfachte Zulassungsverfahren). Generell ist die Gesetzeslage für **Wasserstoff-Energiesysteme** im Wandel: In Deutschland und der EU werden derzeit Normen und Standards angepasst, um dem neuen Technologiefeld gerecht zu werden. So gelten für Wasserstoff-Technologien diverse Vorgaben, u.a. aus der ATEX-Richtlinie (Explosionsschutz für Anlagen in potenziell explosiver Atmosphäre) und der Druckgeräterichtlinie (für H<sub>2</sub>-Speicher und Rohrleitungen). Diese stellen sicher, dass Sicherheit und Qualität gewährleistet sind, bringen aber auch komplexe **Zertifizierungsprozesse** mit sich. Ein Unternehmen, das ein H<sub>2</sub>-Microgrid einsetzen will, muss daher frühzeitig alle notwendigen Genehmigungen (Bau- und Betriebsgenehmigungen, Umweltauflagen etc.) einholen und die Anlage nach anerkannten Standards errichten. Im HyTrA-Demonstrator wurden bereits zahlreiche Sicherheitsmaßnahmen integriert (siehe Kapitel 2), was den Genehmigungsprozess vereinfachte. Dennoch blieb ein erhebliches Maß an Abstimmung mit Behörden und Prüfinstituten erforderlich – ein Aufwand, der durch klarere Rechtsrahmen in Zukunft reduziert werden könnte.

Neben den formalen Vorschriften sind **wirtschaftliche Rahmenbedingungen** wesentlich. Hierzu zählt insbesondere die **Förderung** bzw. Unterstützung der ersten kommerziellen Projekte. Da Wasserstoff-Microgrids eine neue Technologie darstellen, fehlt oft noch die Skalierung, um konkurrenzfähige Preise zu erzielen. **Investitionszuschüsse, Steuererleichterungen oder günstige Kredite** können den Markteinstieg erleichtern. In einigen Ländern (z.B. Südafrika) könnten auch Public-Private-Partnership-Modelle sinnvoll sein, um nachhaltige Energie in Gegenden mit schwacher Infrastruktur zu bringen. Eine weitere Stellschraube ist die Bepreisung von CO<sub>2</sub>: Sollte der CO<sub>2</sub>-Ausstoß künftig teurer werden (durch höhere Zertifikatspreise oder Abgaben), verbessert dies automatisch die Geschäftsmodelle für CO<sub>2</sub>-freie Lösungen wie HyTrA. Umgekehrt könnten steigende Dieselpreise und Stromnetzgebühren die Attraktivität erhöhen. **Langfristige Stromabnahmeverträge** (PPAs) mit garantierten Preisen für grünen Strom könnten ebenfalls Planungssicherheit für Investoren schaffen.



Ein oft unterschätzter Faktor sind **personelle und organisatorische Voraussetzungen**. Der Betrieb eines H<sub>2</sub>-Microgrids erfordert geschultes Personal, das mit den Besonderheiten von Wasserstoff umzugehen weiß. Aspekte wie regelmäßige Dichtigkeitsprüfungen der H<sub>2</sub>-Anlage, sichere Handhabung von Druckflaschen und das Verständnis der Steuerungssoftware müssen trainiert werden. Im HyTrA-Kontext wurde deutlich, dass **Schulungen und verständliche Dokumentation** essenziell sind, damit lokale Techniker das System eigenständig betreiben können. Insbesondere darf der Fachjargon der neuen Technologie kein Hindernis für Anwender darstellen – einfache, praxisorientierte Anleitungen sind gefragt. Zudem sollten Betreiberfirmen eng mit Herstellern oder Systemintegratoren zusammenarbeiten, um im Störfall rasch Unterstützung zu erhalten (z.B. via Fernwartung). Hierfür sind klare Service- und Wartungskonzepte als Bestandteil des Angebots wichtig.

Auch **infrastrukturelle Rahmenbedingungen** spielen eine Rolle. So benötigt ein Microgrid-Container einen geeigneten Aufstellort, idealerweise in der Nähe der Produktionsstätte, mit ausreichend Platz für Solarmodule. Im Falle von HyTrA konnte auf vorhandene Dachflächen für PV zurückgegriffen werden – dies ist nicht überall gegeben. Weiterhin wird für den Elektrolysebetrieb Wasser benötigt. Zwar ist der Verbrauch gering (Dank Rückgewinnung, siehe Kapitel 2), aber ein initialer Füllbedarf sowie Ersatz bei Wartung müssen verfügbar sein. In entlegenen Gebieten muss dies mitbedacht werden (z.B. Regenwasser-Sammeln oder Wasserlieferungen). Zudem fallen **rechtliche Auflagen** an, z.B. bezüglich Brandschutzes: Ein H<sub>2</sub>-Speicher erfordert Abstände zu Gebäuden und ggf. Explosionsschutz-zonen. Diese Vorgaben müssen bei der Planung industrieller Standorte berücksichtigt werden. Ein flankierender Ausbau der lokalen Lieferkette – etwa die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Verbrauchsmitteln (Filter, Katalysatoren) vor Ort – gehört ebenfalls zu den Rahmenbedingungen, die einen reibungslosen Betrieb ausmachen.

Schließlich ist **Akzeptanz** ein weicher, aber entscheidender Faktor. Die Einführung von Wasserstoff als Energieträger erfordert Vertrauen bei Belegschaft, Anwohnern und ggf. Behörden. Transparente Kommunikation über die Sicherheitsvorkehrungen, Vorführung des ungefährlichen Betriebs (wie in Kapstadt geschehen) und Einbindung der Stakeholder von Anfang an helfen, Vorbehalte abzubauen. HyTrA hat hier Pionierarbeit geleistet, indem es als Demonstrationsanlage viel Öffentlichkeitsarbeit betrieben hat. Für einen nachhaltigen industriellen Rollout müssen die **Erfolgsgeschichten** wie HyTrA weithin bekannt gemacht werden, um ein positives Umfeld für weitere Projekte zu schaffen.

Zusammengefasst benötigen Wasserstoff-Microgrids **klare und unterstützende Rahmenbedingungen**: von passenden gesetzlichen Regelungen (die Sicherheit und Netzintegration adressieren) über wirtschaftliche Anreize bis hin zu Schulungs-, Infrastruktur- und Akzeptanzmaßnahmen. Werden diese Faktoren berücksichtigt und proaktiv gestaltet, steht einer erfolgreichen Industrialisierung solcher Systeme wenig im Wege. HyTrA zeigt, dass die Technologie bereit ist – nun muss das Umfeld Schritt halten, damit Wasserstoff-Microgrids ihren Beitrag zur Energiewende leisten können.



## 7 FAZIT UND AUSBLICK

Mit HyTrA wurde ein **wichtiger Meilenstein** auf dem Weg zu resilienten, emissionsfreien Energiesystemen erreicht. Der Demonstrator in Kapstadt liefert den **Echtnachweis**, dass ein solares Wasserstoff-Microgrid in der Praxis funktioniert und signifikante Vorteile bietet – von CO<sub>2</sub>-Einsparungen über Versorgungssicherheit bis hin zu neuen Partnerschaften zwischen Industrie und Forschung. Das Projekt hat damit sowohl die Anforderungen des Zuwendungsgebers erfüllt als auch ein **öffentlichkeitswirksames Schaufenster** für grüne Wasserstofftechnologie geschaffen. Als *verwertungsfähiges Produkt* steht nun ein erprobtes Systemkonzept zur Verfügung, das interessierten Anwendern als **Blau-pause** dienen kann. Die Ergebnisse werden auf der Projektwebsite und über Publikationen transparent geteilt, sodass ein Lerneffekt für ähnliche Vorhaben eintritt.

Natürlich endet mit dem Abschluss von HyTrA die Entwicklung nicht, **vielmehr fängt sie jetzt richtig an**. In den kommenden Jahren liegt der Fokus darauf, das System **weiter zu optimieren und in die Breite zu tragen**. Kurzfristig (2024–2027) wollen die Partner vor allem technische Verbesserungen umsetzen: Die **Wasserstoffspeicherung** soll effizienter und kostengünstiger werden (etwa durch neue Speichermaterialien wie Metallhydride, wie in Zwischenbericht 2022 diskutiert). Auch die **Lade- und Entladezyklen** von Batterie und Brennstoffzelle werden weiter verfeinert, um Lebensdauer und Wirkungsgrad zu erhöhen. Zudem ist geplant, das Microgrid noch stärker in **industrielle Energiesysteme** zu integrieren, etwa durch Nutzung der entstehenden Abwärme (Wärmerückgewinnung für Heizzwecke) oder Kopplung mit Elektromobilitäts-Infrastruktur (H<sub>2</sub> als Backup für Ladesäulen). Diese **Sektorkopplung** könnte den Gesamtnutzen der Anlage weiter steigern.

Mittelfristig (bis 2030) strebt das Konsortium eine **Ausweitung auf neue Märkte** an. Die positiven Erfahrungen in Südafrika sollen auf andere Regionen übertragen werden, darunter ländliche Gebiete in Südamerika und Asien sowie Anwendungen in Europa, wo z.B. Unternehmen mit ehrgeizigen CO<sub>2</sub>-Zielen nach Off-Grid-Lösungen suchen. Dafür sind strategische Allianzen mit lokalen Partnern geplant. Fraunhofer IWU hat bereits angekündigt, mit interessierten Firmen eine *Wertschöpfungsgemeinschaft* aufzubauen, um robuste Microgrids in Serie und zu reduzierten Kosten herzustellen. Das Stichwort lautet **Standardisierung und Massenproduktion**, wodurch Stückkostenvorteile realisiert werden können. Gleichzeitig wird an der **Automatisierung** der Anlagen gearbeitet (Siemens AG ist hier als Partner für die Steuerungstechnik eingestiegen), um Bedienung und Wartung noch einfacher zu machen.

Ein weiterer Ausblick betrifft die **politische und gesellschaftliche Dimension**: HyTrA hat gezeigt, dass grüner Wasserstoff nicht nur ein Schlagwort, sondern konkret umsetzbar ist, wenn Förderprogramme, wissenschaftliche Expertise und Unternehmergeist zusammenkommen. Diese Erfolgsgeschichte soll genutzt werden, um im Dialog mit Politik und Förderern weitere Projekte anzustoßen. Die Lernkurve aus HyTrA – etwa hinsichtlich Genehmigungen, Transport oder Betrieb – fließt in die Gestaltung künftiger Rahmenbedingungen ein. So trägt das Projekt dazu bei, die **Wasserstoffstrategien** auf nationaler und internationaler Ebene mit Leben zu füllen.



Nicht zuletzt bleibt das HyTrA-Microgrid in Kapstadt auch über das Projektende hinaus in Betrieb und dient als **lebendes Labor**. Es können weiterhin Daten gesammelt und beispielsweise saisonale Performance (über mehrere Sommer/Winter-Zyklen) ausgewertet werden. Diese Langzeiterfahrung ist Gold wert für die wissenschaftliche Community und die Weiterentwicklung der Komponenten. Zudem fungiert die Anlage als **Showcase**, den man potentiellen Kunden vorführen kann – eine Rolle, die bereits intensiv genutzt wurde und weiterhin geplant ist (Führungen, Schulungen vor Ort etc.).

## FAZIT

HyTrA beweist die Machbarkeit und den Nutzen eines wasserstoffbasierten Microgrids im industriellen Maßstab. Das Projekt hat Pionierarbeit geleistet, von der Technik über die Logistik bis zur Akzeptanzschaffung. Nun gilt es, dieses Fundament zu nutzen, um **zahlreiche HyTrA-Nachfolger** entstehen zu lassen, sei es unter demselben Namen oder in anderer Form. Mit jedem weiteren Umsetzungsschritt werden die Kosten sinken, die Technik ausgereifter und das Vertrauen größer. HyTrA hat den Anfang gemacht: Ein grünes, autonomes Energiesystem, das Sonne in Wasserstoff verwandelt und jederzeit Strom liefert, ist keine Zukunftsvision mehr, sondern Realität. Dies ist ein ermutigendes Signal auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energiezukunft, in der **Microgrids mit Wasserstoff** einen festen Platz haben werden.

# PROJECT HYTRA

## HYDROGEN TRYOUT AREAL SOUTH AFRICA



Supported by:



based on a decision of the German Bundestag



Funding Code: 67EXI5556A + 67EXI5556B  
Duration: 01.12.2021 – 30.06.2025

