

# MOBILES LAGER- UND BETANKUNGSSYSTEM FÜR DIE VERSORGUNG VON RAKETENSTUFEN UND NUTZLASTEN MIT HOCHKONZENTRIERTEM WASSERSTOFFPEROXID

S. May, C. Glaser, N. M. Riedel, G. Poppe und A. Ohndorf

*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Responsive Space Cluster Competence Center (RSC<sup>3</sup>)  
Eugen-Sänger-Straße 50, 29328 Faßberg, Deutschland*

## Zusammenfassung

Hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid (engl. High-test peroxide: HTP) ist ein vielversprechender „grüner“ Treibstoff für zukünftige Raumfahrtantriebe. Es ist katalytisch zersetzbar und bei seiner chemischen Umsetzung entstehen lediglich Wasserdampf und Sauerstoff als Reaktionsprodukte. Zudem ist es weder giftig noch krebserregend und bei Raumtemperatur flüssig, wodurch die Handhabung im Vergleich zu herkömmlichen, oft kryogenen Treibstoffen deutlich einfacher und kostengünstiger ist. Der Einsatz beispielsweise in Hybridtriebwerken ermöglicht eine inhärente Widerzündfähigkeit und eine gute Schubdrosselung über einen großen Einsatzbereich, was derartige Triebwerke insbesondere für den Einsatz als Oberstufenantrieb für kleinere Trägersysteme interessant macht. Aber auch die Verwendung von HTP in Lageregelungs- und Satellittriebwerken, unter anderem als Substitut für das karzinogene Hydrazin, rückt durch die sich stets weiter verschärfenden REACH-Anforderungen immer mehr in den Fokus wissenschaftlicher Forschung und kommerzieller Anbieter.

Trotz der vereinfachten Handhabung erfordert die Verwendung von HTP eine geeignete Infrastruktur für Transport, Lagerung und Betankung. Um eine weltweite Verfügbarkeit dieser Infrastruktur zu ermöglichen, hat das Responsive Space Cluster Competence Center (RSC<sup>3</sup>) des DLR den „Mobile Hydrogen Peroxide Transport and Storage Container“ (MoHyPer) entworfen und gebaut. Das MoHyPer ist in einen 20-Fuß High-Cube-Container integriert und für den Land-, See- und Bahntransport zertifiziert. Es vereint folgende Fähigkeiten:

- Transport und Lagerung von bis zu 1100 Liter HTP (klimatisiert und fernüberwachbar)
- Reinstwasserbereitstellung mittels integriertem Aufbereitungssystem
- Fernsteuerbare Oxidatorbetankung durch integriertes Pump- und Leitungssystem
- Fernsteuerbare Hochdruckversorgung für Druckförderungssysteme mit Inertgasen bis 1000 bar
- Bereitstellung notwendiger Sicherheitseinrichtungen (z.B. Notdusche, Notfallassflutung)

Somit ermöglicht das MoHyPer den zuverlässigen, reaktionsschnellen, flexiblen und sicheren Betrieb von mit Wasserstoffperoxid betriebenen Raketentufen und Nutzlasten an beliebigen Startplätzen weltweit.

## 1. MOTIVATION

Die Nachfrage nach einem kostengünstigeren Zugang zum Weltraum hat sich in den letzten Jahren stetig beschleunigt. Einer der Folgeeffekt dieser Entwicklung ist, dass weltweit zahlreiche neue Startplätze für Raumtransportsysteme geplant und geschaffen werden. Insbesondere der Einschuss in polare Umlaufbahnen, welche häufig von Micro-Launchern bedient werden, erfordern keine Startplätze in der Nähe des Äquators, wodurch sich das Spektrum der möglichen Standorte deutlich erweitert hat. Die zunehmenden Startaktivitäten verstärken jedoch auch Bedenken über mögliche Auswirkungen der Raumfahrt auf die Umwelt, was zu einem Anstieg der Forschung im Bereich umweltfreundlicher Treibstoffe geführt hat. Hochkonzentriertes Wasserstoffperoxid (HTP) gilt als vielversprechende umweltfreundliche Treibstoffalternative für den Einsatz in Raketentufen sowie bei orbitalen Anwendungen [1-4]. Dennoch

fehlt es den meisten der derzeitigen Startplätze an einer zuverlässigen und sicheren Infrastruktur für die Durchführung von Starts bei denen HTP benötigt wird. Das MoHyPer [5], welches vom RSC<sup>3</sup> [6-8] entwickelt und zur Fertigung in Auftrag gegeben wurde, soll diese Lücke schließen. Das in einen Standard 20-Fuß-High-Cube-Container integrierte System dient dem sicheren Transport sowie der Lagerung von HTP und bietet darüber hinaus die Möglichkeit zur sicheren Betankung und, bei Bedarf, Bedrückung von Raketentufen und Nutzlasten (siehe BILD 1). Zur Ausrüstung gehören unter anderem Heiz- und Kühlsysteme, Überdrucksicherungen, Sicherheits- und Notfalleinrichtungen sowie ein Überwachungssystem. Dabei ist das MoHyPer thermisch isoliert und vollständig fernsteuerbar. Das HTP selbst wird in fünf, von der Firma EVONIK patentierten, Tanks mit jeweils 220 Litern Fassungsvermögen gelagert und transportiert.



BILD 1: Das Mobile Wasserstoffperoxid Transport- und Lagersysteme „MoHyPer“

## 2. AUSLEGUNGSPROZESS UND FÄHIGKEITEN DES MOHYPER

Das Ziel des MoHyPer Designprozesses war es, eine mobile Infrastruktur zu schaffen, welche die komplette Versorgung von druckgespeisten Raketentufen oder Satellitensystemen mit HTP als Treibstoff ermöglicht. Es wurde daher in drei Funktionseinheiten unterteilt: eine Wasserstoffperoxidlagereinheit, eine Druckversorgungseinheit und eine Betankungseinheit. Darüber hinaus mussten alle diese Einheiten den Transport- und Sicherheitsvorschriften entsprechen. Aus diesen Anforderungen wurden in der frühen Konzeptionsphase folgende spezifische Bedürfnisse abgeleitet:

### Anforderungen an die Mobilität

- Alle Komponenten müssen in einen einzigen 20 Fuß langen intermodalen Container integriert werden, welcher der ISO-Norm 668 entspricht.
- Der Container muss per LKW, Bahn und Schiff transportiert werden können.
- Alle internen Komponenten müssen sicher montiert und für die Transportbedingungen befestigt sein.

### Anforderungen an die sichere Lagerung

- Die Lagereinheit des Containers muss temperaturkontrolliert und isoliert sein, um die richtigen Lagerbedingungen für HTP selbst unter extremen Umweltbedingungen zu gewährleisten.
- Die Lagereinheit muss mit einem aktiven Belüftungssystem ausgestattet sein, um den Aufbau von kritischen Gaskonzentrationen zu verhindern.
- Der Behälter muss über eine separate Zugangstür für das Personal verfügen, um einen Fluchtweg für Arbeiten innerhalb der Lagereinheit zu schaffen.
- Die Lagereinheit muss über geeignete Sicherheitseinrichtungen für die zuverlässige Langzeitlagerung von HTP verfügen.

### Anforderungen an das Druckversorgungssystem

- Der Behälter muss mit einem leistungsstarken Kompressorsystem ausgestattet sein, welches einen Ausgangsdruck von mindestens 600 bar liefern kann.
- Um Verunreinigungen zu vermeiden, muss das Drucksystem von der Lagereinheit getrennt sein.
- Das Drucksystem muss so aufgebaut sein, dass eine vollständige Fernüberwachung und -steuerung möglich ist.

### Anforderungen an das Betankungssystem

- Der Behälter muss mit einer leistungsstarken, sicheren Dosierpumpe für eine genaue Befüllung über eine Entfernung von bis zu 150 Metern ausgestattet sein.
- Das Gewicht jedes Lagerfasses muss zur redundanten Kontrolle der Tankfüllmenge überwacht werden.
- Das Betankungssystem muss so aufgebaut sein, dass eine vollständige Fernüberwachung und -steuerung möglich ist.
- Der Behälter muss über ein Reinstwasser-versorgungssystem zur Reinigung aller Komponenten des Treibstoffbetankungssystems verfügen (einschließlich der Tanks und anderer medienberührender Komponenten des Fluidsystems innerhalb der Raketenstufe oder der Nutzlast).
- Eine integrierte Notdusche mit der notwendigen Wasserversorgung ist für sichere Betankungs- und Handhabungsvorgänge erforderlich.

Auf der Grundlage dieser frühen Anforderungen wurden mehrere mögliche Designs entworfen und diskutiert. Das daraus resultierende Konzept besteht aus zwei separaten Räumen innerhalb des Containers. Der Tankraum erfüllt alle Anforderungen für die Lagerung, Handhabung und Betankung von HTP. Im Technikraum befinden sich die Druckversorgungssysteme und alle anderen notwendigen technischen Komponenten, wie die zentrale Stromversorgung, das Steuerungssystem und der externe Teil der Klimaanlage. An der Außenseite des MoHyPer wurde eine beheizbare Notdusche installiert.

### 2.1. Tankraum

Der Tankraum des MoHyPer (siehe BILD 2) erfüllt alle Anforderungen für den sicheren Transport, die Lagerung und die Betankung von HTP bis zu 1100 Litern. Er ist mit fünf Befestigungspunkten für zertifizierte Transport- und Lagerfässer, mit einem jeweiligen Fassungsvermögen von 220 Litern, einschließlich einzelner Fassaagen und Temperatursensoren ausgestattet. Der Innenraum ist vollständig mit HTP-verträglichen Edelstahlelementen ausgekleidet. Ein Reinstwassersystem mit

einer Kapazität von bis zu 1000 Litern pro Stunde wurde integriert. Zudem ist eine Dosierpumpe mit einer Kapazität von bis zu 500 Litern pro Stunde, bei einer Versorgungsentfernung von bis zu 150 Metern in Kombination mit einer Gesamtförderhöhe von 10 Metern, ebenfalls Bestandteil der Anlage. Das Betankungssystem ist ferngesteuert und der gesamte Tankraum ist mit einer geeigneten Auffangwanne ausgestattet.



BILD 2: Lagerraum des MoHyPer

Der Tankraum wird durch eine Klimaanlage in Kombination mit geeigneter thermischer Isolation temperiert. Ein Belüftungssystem reguliert den Luftaustausch und verhindert die Entstehung von kritischen, potenziell explosiven Gasgemischen. Alle Sensoren des Systems werden aus der Ferne überwacht. Außerdem ist ein automatisches optisch-akustisches Gefahrenwarnsystem installiert. Um auf eine mögliche, potentiell unkontrollierte Selbstzersetzung von Wasserstoffperoxid zu reagieren, sind ein Notfall-Fassflutungssystem sowie eine Druckentlastungsfläche integriert. Das MoHyPer benötigt eine externe Starkstrom- sowie Wasserversorgung bei beliebiger Wasserqualität.

## 2.2. Technikraum



BILD 3: Technikraum des MoHyPer

Zusätzlich zu den Hilfs- und Unterstützungssystemen wird das Druckversorgungssystem im Technikraum

installiert (siehe BILD 3). Das Druckversorgungssystem besteht aus einer zweistufigen Kompressoranlage, die einen Tankdruck von bis zu 1000 bar mit Inertgasen wie Stickstoff oder Helium bereitstellt. Das Druckmedium muss extern in Form eines 200- oder 300-bar-Gasspeichers bereitgestellt werden. Das System wird aus der Ferne überwacht und gesteuert.

## 3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Hochprozentiges Wasserstoffperoxid könnte eine unumgängliche Lösung für einen grüneren und sichereren Zugang zum Weltraum sein. In den letzten Jahren hat HTP dank Fortschritten in der Technologie und bei den Herstellungsverfahren seinen ehemals schlechten Ruf abgelegt. Es kann über lange Zeiträume mit vernachlässigbarer Zersetzung gelagert werden und geschultes Personal kann sicher mit dem Oxidationsmittel umgehen. Allerdings ist für die langfristige Lagerung und den sicheren Betrieb eine entsprechende Infrastruktur erforderlich, die an den meisten Startplätzen fehlt. Das Responsive Space Cluster Competence Center (RSC<sup>3</sup>) des DLR hat diese Lücke mit dem mobilen Wasserstoffperoxid-Transport- und Lagerbehälter (MoHyPer) geschlossen. Dieses steht für künftige institutionelle und kommerzielle Anwendungen als Prototyp zur Verfügung. Der erste Beweis für die Leistungsfähigkeiten des MoHyPer wird der Start einer einstufigen hybriden Höhenforschungsrakete im Rahmen des DLR-Projektes ATHEAt sein, die mit Wasserstoffperoxid als Oxidator und HTPB-basiertem Brennstoff betrieben wird [9]. Das MoHyPer steht sowohl der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch kommerziellen Raumfahrtunternehmen zur Verfügung und leistet einen Beitrag zur nachhaltigeren, flexibleren und sichereren Raumfahrt.

## LITERATUR

- [1] A. E. S. Nosseir, A. Cervone, and A. Pasini, "Review of State-of-the-Art Green Monopropellants: For Propulsion Systems Analysts and Designers," *Aerospace*, vol. 8, p. 20, Jan. 2021.
- [2] A. Okninski, W. Kopacz, D. Kaniewski, and K. Sobczak, "Hybrid Rocket Propulsion Technology For Space Transportation Revisited - Propellant Solutions and Challenges," *FirePhysChem*, Dec. 2021.
- [3] W. Kopacz, A. Okninski, A. Kasztankiewicz, P. Nowakowski, G. Rarata, and P. Maksimowski, "Hydrogen peroxide – A promising oxidizer for rocket propulsion and its application in solid rocket propellants," *FirePhysChem*, vol. 2, pp. 56–66, Mar. 2022.
- [4] O. Bozić, D. Pormann, D. Lancelle, and S. May, "Enhanced development of a catalyst chamber for

the decomposition of up to 1.0 kg/s hydrogen peroxide,” CEAS Space Journal, vol. 8, pp. 77–88, June 2016.

- [5] S. May, N. M. Bierwagen, G. Poppe, C. Glaser and A. Ohndorf, “Mobile Hydrogen Peroxide Transport and Storage Container for Worldwide Rocket Launches”. 9th Edition of the Space Propulsion Conference, May 2024, Glasgow, Scotland.
- [6] G. Poppe, S. May, N. M. Bierwagen and T. Eggers, “The Site Trauen of the German Aerospace Center - Past, Present and Future of the Largest Test Site for Rocket Engines in Germany“. 3rd Ground-Based Space Facilities Symposium, Dec. 2022, Marseille, France.
- [7] A. Ohndorf and W. Jung, “Das RSC<sup>3</sup> als Beitrag zur gesamtstaatlichen Sicherheitsfürsorge“. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2022, Dresden, Germany.
- [8] D. Freiknecht, D. Kleemann, M. Lehmann and M. Mück, “Establishing Responsive Space: A maritime situational awareness experiment”. Proceedings of the first European Workshop on Maritime Systems Resilience and Security (MARESEC), June 2022, Bremerhaven, Germany.
- [9] A. Dabanović, J. Martin, S. May and T. Eggers, “Design of a sounding rocket upper stage based on the hybrid rocket engine VISERION”, CEAS Space Journal, 2022.  
<https://doi.org/10.1007/s12567-022-00451-2>