

ALTERUNGSVERHALTEN VON KATALYSATORMATERIAL FÜR WASSERSTOFFPEROXID BEI GROSSEN MASSENSTRÖMEN

N. M. Riedel*, A. Ohndorf*, Ch. Mundt§

* Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Kompetenzzentrum für Reaktionsschnelle Satellitenverbringung, Eugen-Sänger-Str. 50, 29328 Faßberg, Deutschland

§ Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Luft- und Raumfahrt, Institut für Thermodynamik, Werner Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland

Zusammenfassung

Die Katalysatoralterung stellt einen wichtigen Prozessparameter bei der Katalyse von Wasserstoffperoxid dar. In der Theorie sind verschiedene Alterungsmechanismen wie die Vergiftung, Verschmutzung, thermische und mechanische Schäden, sowie die Korrosion bekannt. Um das Katalysatormaterial auf Alterungserscheinungen zu untersuchen, wird das BET-Verfahren und die Chemiesorption verwendet.

Es wurden erste Daten des Katalysatormaterials von Vor- und Triebwerkstests des VISERION Triebwerkes untersucht. Der BET-Wert und der mittlere Porendurchmesser sind ein erster Indikator für die Alterung. Der Dispersionsgrad stellt einen eindeutigeren Bewertungsparameter dar. Bei großen Massenströmen ist die Alterung bezüglich des Dauerbelastungszustandes von Vorteil. Bei der Alterung spielt eine Kombination mehrerer Mechanismen eine Rolle.

Stichworte

Raumfahrt, Wasserstoffperoxid, Katalysator

NOMENKLATUR

Formelzeichen

a_s	Spezifische Oberfläche (BET)	m^2/g
C	BET Parameter	1
D	Metalldispersität	1
d	Mittlerer Porendurchmesser	nm
M	Molmasse des Metalls	kg/mol
n_a	Spezifische Menge des Adsorbats	mol/g
n_m	Monoschichtkapazität	mol/g
p	Druck	bar
T	Temperatur	K
V	Spezifisches Porenvolumen	cm^3/g
W	Metallanteil des Katalysators	1
x	Stöchiometriekoeffizient	1

Indizes

0	Bezugspunkt
H	Hüttig
S	Schmelzpunkt
T	Tamman

Abkürzungen

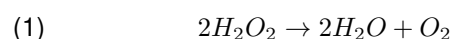
BET	Brunauer-Emmett-Teller
H_2O	Wasser
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
O_2	Sauerstoff

1. EINLEITUNG

Die Katalysatoralterung bezeichnet den Verlust der katalytischen Aktivität über der Zeit [1]. Die Zeiteinheiten der Katalysatoralterung können dabei sehr unterschiedlich sein: von einigen Sekunden bis hin zu Jahren [1]. In einem gut ausgelegten chemischen Prozess ist die Alterung des Katalysators bekannt und verläuft langsam, um den Prozess kosteneffizient zu betreiben.

Für die Katalyse von Wasserstoffperoxid eignen sich Festbettkatalysatoren [2]. Dabei handelt es sich häufig um Aluminium-Oxyd Granulat mit einer großen Oberfläche. Dieses wird mit dem eigentlichen Katalysatormaterial beschichtet. Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird sich auf einen Platin Katalysator konzentriert.

Das Wasserstoffperoxid zersetzt sich in Wasserdampf und gasförmigen Sauerstoff. Die Reaktionsgleichung ist in Gleichung 1 dargestellt.



Bei der Zersetzung wird Energie in Form von Wärme frei. Es handelt sich somit um einen exothermen Prozess. Bei niedrigeren Wasserstoffperoxidkonzentration wird das Wasserstoffperoxid mit Wasser verdünnt. Dadurch reduziert sich die entstehende Wärme bei der Zersetzung [3].

Die Zersetzung des Wasserstoffperoxids findet in sogenannten Katalysatorkammern statt, die den Katalysator in Form einer Schüttung enthalten. Bei Monergoltriebwerken, die mit Wasserstoffperoxid arbeiten, wird der Schub über die Katalysatorkammer in Kombination mit einer Düse erzeugt. Bei Hybridraketenantrieben wird die Katalysatorkammer vor den eigentlichen Brennkammer eingebaut. Die heißen Zersetzungsprodukte werden direkt in die Brennkammer eingeleitet und ermöglichen eine automatische Zündung [3]. Somit wird keine zusätzliche Zündinfrastruktur benötigt.

Die Verwendung von Wasserstoffperoxid für Raketenantriebe hat aufgrund der umweltfreundlichen Eigenschaften des Treibstoffes in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen [4]. Neben der einfachen Handhabung spielt auch die hohe Dichte ($1,45 \text{ g/cm}^{-3}$ [5]) eine entscheidende Rolle. Sie bietet die Möglichkeit kleinere Tanks und damit kompaktere Systeme zu verwenden. Außerdem ist es möglich den Treibstoff einfach zu lagern, da keine kryogene Technik benötigt wird, wie bei vielen anderen Treibstoffen [5].

Um die maximalen Leistungen der Katalysatoren für ihre Anwendungssysteme zu ermöglichen ist es wichtig, sich mit dem Thema der Katalysatoralterung zu beschäftigen. Dazu werden bereits Untersuchungen mit kleinen Massenströmen und vielen Durchläufen durchgeführt [6]. Die Übertragbarkeit in den Anwendungsbereich ist aber nur für Monergoltriebwerke möglich, da bei Hybridraketenantrieben mit wesentlich höheren Massenströmen gearbeitet wird. Diese Veröffentlichung befasst sich deshalb mit dem Thema der Katalysatoralterung vor dem Hintergrund großer Massenströme, um Ergebnisse für die Anwendung in Hybridraketenantrieben zu erhalten.

Dazu wird zuerst in Abschnitt 2 auf die unterschiedlichen Mechanismen eingegangen, die eine Alterung bewirken. Anschließend werden verschiedene Methoden für die Analyse von Katalysatoren in Abschnitt 3 vorgestellt. Danach werden in Abschnitt 4 die durchgeführten Hybridraketenantriebsversuche bei denen das Katalysatormaterial verwendet wurde erläutert. Die Laborergebnisse des Katalysatormaterials werden in Abschnitt 5 analysiert. Schließlich ist in Abschnitt 6 eine Zusammenfassung der hier vorliegenden Veröffentlichung geschrieben.

2. ALTERUNGSMECHANISMEN

Es gibt verschiedene Mechanismen, die sich auf die Alterung von Katalysatoren auswirken. Diese lassen sich in unterschiedliche Kategorien einordnen: Chemisch, mechanisch und thermisch [1].

2.1. Vergiftung

Die Vergiftung gehört zu den chemischen Prozessen [1]. Sie beschreibt den Vorgang, dass sich Beiprodukte der Strömung mittels Chemisorption an die aktiven Flächen des Katalysators binden [7]. Durch die chemische Bindung, die eingegangen wird, ist der Prozess quasi irreversibel.

Bei der Vergiftung wird unterschieden nach selektiver und nicht selektiver Vergiftung [7]. Die nicht selektive Vergiftung bezeichnet einen linearen Zusammenhang zwischen der Aktivität des Katalysators und der aufgenommenen Beiprodukte. Die Katalysatoroberfläche ist gleichmäßig anfällig für die Vergiftung. Bei der selektiven Vergiftung sind besonders die aktiven Bereiche der Katalysatoroberfläche anfällig und die Aktivität des Katalysators fällt wesentlich rasanter [7]. Einige Elemente sind aufgrund ihrer chemischen Beschaffenheit besonders für die Vergiftung geeignet. Dazu zählen Elemente der Hauptgruppe V, VI und VII, sowie einige Metalle [1].

2.2. Verschmutzung

Die Verschmutzung gehört zu den mechanischen (physikalischen) Prozessen [1]. Sie beschreibt den Verlust der Aktivität aufgrund von blockierten Flächen oder Poren.

2.3. Thermische Schäden

Die thermischen Schäden sind den thermischen und somit den physikalischen Prozessen [1] zuzuordnen. Durch Sintervorgänge reduzieren sich die aktiven Flächen des Katalysators aufgrund von strukturellen Modifikationen. Es findet eine Agglomeration der Metallbeschichtung des Katalysators zu einer Struktur mit geringerem Oberflächen-Volumen-Verhältnis statt [7]. Der Sinterprozess kann in verschiedene Stufen unterteilt werden. Mehr dazu ist in [8] zu finden.

Die Temperatur spielt eine entscheidende Rolle für den Sinterprozess. Bei Erreichen der Hüttig-Temperatur T_H (Gleichung 2) werden die ersten Atome mobil. Ab der Tamman-Temperatur T_T (Gleichung 3) kann von einer Mobilität der Masse ausgegangen werden [9].

$$(2) \quad T_H = 0,3 \cdot T_S$$

$$(3) \quad T_T = 0,5 \cdot T_S$$

Die empirischen Korrelationen der Hüttig- und Tamman-Temperatur beziehen sich auf die Schmelztemperatur T_S des Katalysatormaterials.

2.4. Mechanische Schäden

Die mechanischen Schäden lassen sich ebenfalls den physikalischen Ursachen zuordnen. Das Katalysatormaterial ist in seinem Leben extremen Bedingungen ausgesetzt. Neben der Temperatur spielt

auch der Druck in der Katalysatorkammer eine Rolle. So kommt es zu Abrieb des Katalysatormaterials und zu Zerkleinerung [9].

Wenn eine Flüssigkeit durch das Katalysatorbett strömt kann es auch zur Auswaschung und Verlust des Katalysatormaterials kommen [9].

2.5. Korrosion

Die Korrosion gehört zu den chemischen Einflüssen auf den Katalysator. Das Fluid, welches durch das Festbett strömt, kann korrosiv sein. Ein pH-Wert von über 12 oder unter 3 kann zur Korrosion des Aluminium Trägermaterials führen [9].

3. UNTERSUCHUNGSMETHODEN VON KATALYSATOREN

Für die Untersuchung der Katalysatoren wurden bisher zwei Messverfahren verwendet. Diese werden in ihren generellen Abläufen im Folgenden erläutert. Neben der BET-Vermessung und Chemisorption ist es auch möglich auf die Vergiftungselemente zu untersuchen.

3.1. BET-Verfahren

Beim BET-Verfahren wird die Oberfläche nach dem Messverfahren von Brunauer-Emmett-Teller (BET) bestimmt. Dieses hat sich als weit verbreitetes Verfahren durchgesetzt im Bereich der Charakterisierung von Oberflächen poröser Medien, da es aufgrund der Komplexität der porösen Medien nicht möglich ist eine absolute Oberfläche zu bestimmen [10].

Beim BET-Verfahren wird ein Adsorbat verwendet, welches leichte Bindungen mit der Oberfläche des porösen Mediums eingeht. Hierbei wird sowohl die extern zugängliche Oberfläche als auch die interne Porenoberfläche mit einer Monoschicht des Adsorbates belegt. Als Adsorbat wird häufig Stickstoff mit einer Temperatur von 77,3 K verwendet. Die Menge des adsorbierten Gases n_a wird bei unterschiedlichen Drücken gemessen und über dem Relativdruck p/p_0 aufgetragen. Eine Adsorptionsisotherme entsteht [10].

Es gibt drei gängige Verfahren, um die Adsorptionsisotherme zu bestimmen: volumetrisch, gravimetrisch und kalorimetrisch. Mit Hilfe der BET-Gleichung 4 kann der BET-Parameter C und die Monoschichtkapazität n_m bestimmt werden [10].

$$(4) \quad \frac{p/p_0}{n_a(1-p/p_0)} = \frac{1}{n_m C} + \frac{C-1}{n_m C} \frac{p}{p_0}$$

Bei der Verwendung von Stickstoff als Adsorbat ergibt sich die BET-Oberfläche a_s nach Gleichung 5 [10].

$$(5) \quad a_s = 9,76 \cdot 10^4 \cdot n_m$$

Probenr.	Dauer [s]	Kaltstarts [-]	H_2O_2 [kg]
1	0	0	0
2	20	1	96
3	48	2	231
4	>100	>8	>600

TAB 1. Durchgeführte Tests

3.2. Chemisorption

Bei der Chemisorption wird der Dispersionsgrad des Katalysatormaterials ermittelt. Dieser beschreibt die Anzahl der für die Chemisorption zugänglichen Metallatome im Verhältnis zur Gesamtzahl der Metallatome auf der Katalysatoroberfläche [11].

Das Verfahren der Chemisorption basiert auf der Bestimmung der Menge des Adsorbats. Dieses bildet eine monomolekulare Schicht n_m auf der Oberfläche. Wenn der stöchiometrische Koeffizient x der Chemisorption bekannt ist, kann mit Hilfe des Metallanteil des Katalysators W der Dispersionsgrad D (Gleichung 6) berechnet werden [11]. M ist hierbei die Molmasse des Metalls.

$$(6) \quad D = \frac{n_m \cdot 10^3 \cdot M}{W \cdot x}$$

Es gibt unterschiedliche Verfahren, um die Chemisorption durchzuführen. Weiteres ist in [12] zu finden. Die Wahl des Adsorbats ist abhängig vom Katalysator. Bei Platin wird Wasserstoff empfohlen [11].

4. VERSUCHE

Für die Analyse der Katalysatoralterung wurden Proben aus dem laufenden Testbetrieb entnommen. Bei den Tests handelt es sich um Vortests oder Triebwerkstests des VISERION Triebwerkes [13]. Dieses verwendet Wasserstoffperoxid mit einer Konzentration von 87,5 % und hydroxyl-terminiertes Polybutadien (HTPB) als festen Brennstoff. Es erreicht ein Schub von 11,5 kN über eine Zeit von 27 s. Da es sich bei dem Triebwerk VISERION um ein leistungsfähiges Hybridraketenriebwerk handelt, das für eine Oberstufe entwickelt wurde, ist dieses mit einem Nennmassenstrom von 4,5 kg/s Wasserstoffperoxid ausgelegt [13]. Somit wird bei diesen Versuchen ein wesentlich höherer Massenstrom und damit auch eine höheren Belastung für das Katalysatormaterial erreicht als in [6]

Im Rahmen der Versuche konnten insgesamt vier Proben genommen werden. Diese sind in Tabelle 1 gezeigt. Bei der Probe Nr. 1 handelt es sich um das neue unbenutzte Material. Die Probe Nr. 2 stammt von einem Katalysator Vortest. Die Probe Nr. 3 wurde nach dem Katalysator Vortest (Nr. 2) und einem Triebwerkstest genommen. Bei der Probe Nr. 4 handelt es sich um einen Vergleichspunkt, dieser beinhaltet Katalysatormaterial, welches nicht mehr für den Einsatz geeignet ist und seine Reaktivität

Probenr.	BET [%]	d [%]	V [%]	D [%]
1	100	100	100	100
2	44,9	247,9	111,1	126,4
3	43,0	270,1	115,4	63,7
4	32,1	347,6	111,6	0,2

TAB 2. Laboregebnisse

verloren hat.

In der Tabelle sind für jede Probe die Nutzungsdauer in Sekunden, die Anzahl der Kaltstarts und die zersetzte Menge Wasserstoffperoxid in Kilogramm angegeben.

5. ERGEBNISSE

Die Proben wurden im Labor untersucht. Dabei wurde die BET-Oberfläche aus Abschnitt 3.1 bestimmt, außerdem der mittlere Porendurchmesser d und das Porenvolumen V . Des Weiteren wurde die Dispersion D aus Abschnitt 3.2 mittels Chemiesorptionsverfahren ermittelt.

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Diese wurden auf die Probe Nr. 1 normiert, um das Verhältnis zueinander besser zu analysieren.

Im Folgenden sollen zwei Fragen diskutiert werden. Erstens die Frage, welcher der Parameter aus Tabelle 2 eignet sich, um als Indikator für die Inaktivität des Katalysatormaterials verwendet zu werden? Zweitens die Frage, über welchem Parameter aus Tabelle 1 sollte der Indikator-Parameter sinnvoller Weise aufgetragen werden?

5.1. Welcher Messwert eignet sich für die Darstellung der Inaktivität?

Um die Frage, nach dem Messwert, der einen Indikator für die Inaktivität gibt, zu lösen, wurden die Werte aus Tabelle 2 graphisch in Abbildung 1 aufgetragen. Die einzelnen Punkte (blau) stehen für die Messwerte, während die Linie (orange) den Wert des nicht mehr reaktiven Katalysatormaterials (Probe Nr. 4) zeigt.

Der Wert der BET-Oberfläche nimmt mit der Zeit ab und nähert sich an die Linie an. Die Oberfläche wird auf ungefähr die Hälfte reduziert. Somit sinkt die für die Katalyse zur Verfügung stehende Angriffsfläche. Zwischen der Probe Nr. 1, also dem Neumaterial, und der Probe Nr. 2 nach dem ersten Test ist ein wesentlich stärkerer Abfall zu beobachten, als zwischen der Probe Nr. 2 und 3. Die extra für den katalytischen Prozess erzeugte große Oberfläche ist also nur bei neuwertigen Material verfügbar. Danach pendelt sich die Oberfläche auf einen Wert ein und sinkt nur noch langsam. Bei [6] ist die normalisierte BET-Oberfläche nur sehr leicht gesunken auf einen Wert von etwas über 90%. Dies zeigt, dass das Katalysatormaterial bei den hohen Massenströmen einer deutlicheren Belastung ausgesetzt ist.

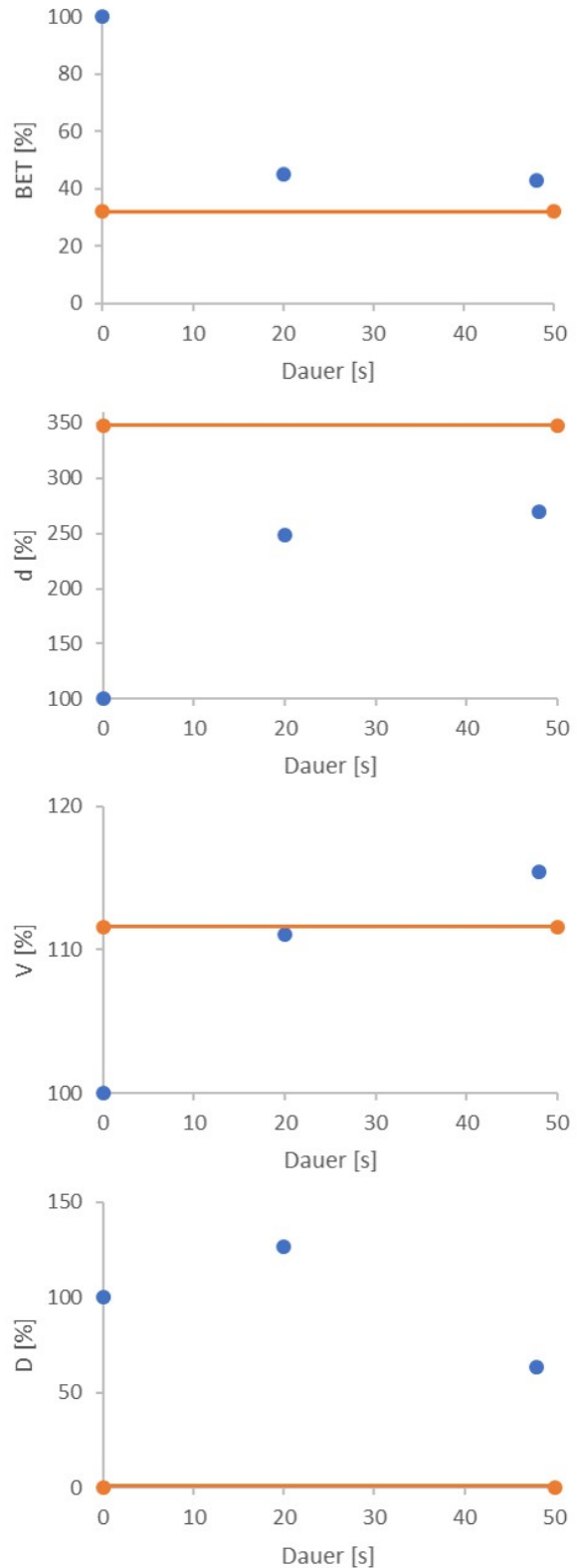


BILD 1. BET-Wert, mittlerer Porendurchmesser d , Porenvolumen V und Dispersion D über der Zeit

Der mittlere Porendurchmesser gibt einen Mittelwert über alle detektierten Porendurchmesser an. Da der mittlere Porendurchmesser steigt, bedeutet dies, dass sich die Poren des Katalysatormaterials aufweiten.

Das Porenvolumen steigt ähnlich zum mittleren Porendurchmesser an. Dies resultiert aus den größeren Porendurchmessern, die auch ein größeres Porenvolumen beinhalten. Es lässt sich beobachten, dass die Probe Nr. 4 ein kleineres Porenvolumen besitzt als die Probe Nr. 3. Ebenfalls ist die Probe Nr. 2 sehr nah an dem Wert der Probe Nr. 4 und zeigt trotzdem eine gute Reaktivität.

Der Wert der Dispersion zeigt einen interessanten Verlauf. Dieser steigt zwischen Probe Nr. 1 und 2 leicht an, bevor er zwischen der Probe Nr. 2 und 3 deutlich absinkt. Der Vergleichswert des nicht reaktiven Katalysators ist sehr niedrig. Bei den Laboruntersuchungen hat die Probe Nr. 4 kaum eine Reaktion auf das Adsorbat gezeigt, während bei dem reaktiven Katalysatormaterial eine deutliche Reaktion zu beobachten war.

Die ersten drei Parameter, BET, mittlerer Porendurchmesser und Porenvolumen, beschreiben die Oberfläche des Katalysatormaterials. Sie charakterisieren somit vor allem den Aluminium-Oxyd-Träger des Katalysators. Sie können deshalb nur einen Anhaltspunkt geben, um einen Schluss bezüglich der Reaktivität des Katalysators zu ziehen. Wenn die Oberfläche, die das Katalysatormetall trägt, zu klein wird, um genügend Katalysator zur Verfügung zu stellen, kann von einem für den Prozess nicht mehr reaktiven Katalysator ausgegangen werden. Der BET-Wert gibt somit einen ersten Eindruck für den Zustand des Materials, wenn der Versagenszustand für das Katalysatormaterial im Prozess bekannt ist. Das Porenvolumen ermöglicht keine Aussage über die Reaktivität des Katalysators. Dies kann daran liegen, dass labyrinthartige innere Poren zwar zum Volumen beitragen, aber keine zusätzlichen Angriffspunkte für die Katalyse bilden. Der mittlere Porendurchmesser verhält sich ähnlich wie der BET-Wert und kann für einen ersten Eindruck mit betrachtet werden.

Die Dispersion liefert den besten Wert, um eine Aussage über die Reaktivität zu treffen, da sie nicht die Oberfläche allgemein, sondern die Menge an Katalysator auf der Oberfläche selbst betrachtet. Wenn kein Katalysator mehr auf dem Trägermaterial vorhanden ist, reagiert das Material nicht mehr auf das Adsorbat und es wird ein Dispersionwert von 0 erreicht.

5.2. Über welchem Wert wird der Messwert aufgetragen?

Als nächstes werden verschiedene Werte für die Abzisse analysiert. Dafür wurde der BET-Wert über der Verwendungsdauer, der Anzahl der Katalysatorstarts und der Menge an zersetztem Wasserstoffperoxid in Abbildung 2 aufgetragen.

Die Verwendungsdauer und die zersetzte Menge an

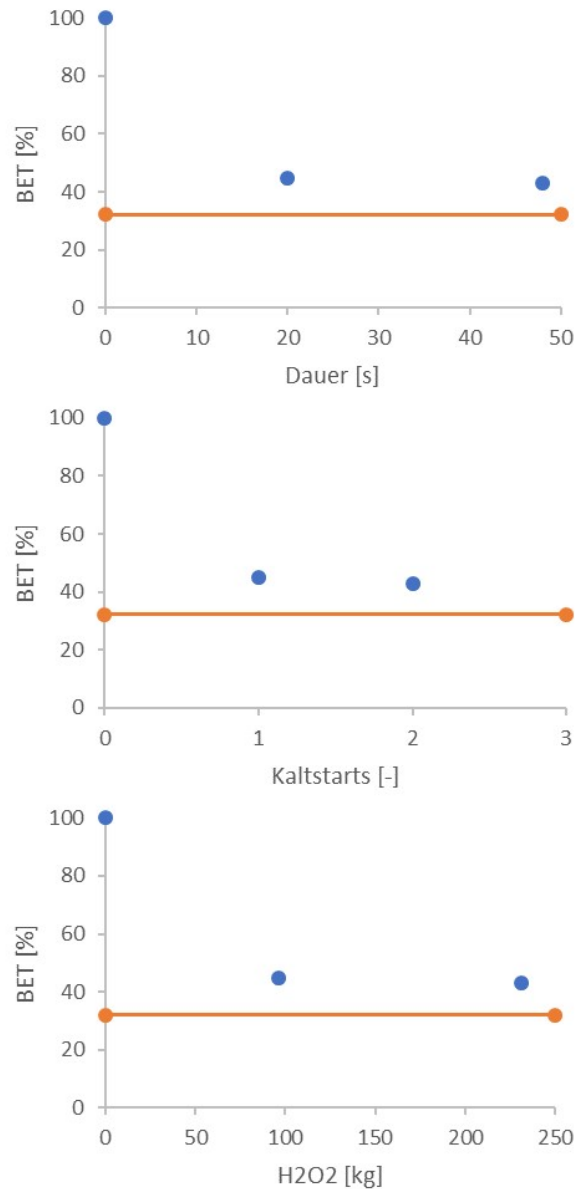


BILD 2. BET-Wert aufgetragen über der Zeit, der Anzahl der Kaltstarts und der zersetzten Menge Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid stellen die Belastungsdauer bzw. -menge dar. Bei der Anzahl der Kaltstarts geht es weniger um die Belastungsdauer, sondern eher um die Anzahl der maximalen Belastungen. Als Kaltstart wird hierbei der Prozess von flüssigem Wasserstoffperoxid tritt bei Umgebungstemperatur in die Katalysator ein bis zur vollständigen Zersetzung des Wasserstoffperoxids und Erreichen der Einsatztemperatur bezeichnet. Besonders bei vielen kurzen Tests bietet sich die Auftragung über der Anzahl der Kaltstarts an, da diese die kritischere Belastung darstellen. Bei großen Massenströmen, die über eine längere Zeit laufen, ist die kritische Belastung eher im Bereich der Dauer oder Menge zu sehen, weshalb eine Auftragung über diesen Parametern als sinnvoll erachtet wird.

5.3. Alterungsmechanismen

Bei Katalysatorkammern mit Wasserstoffperoxid treten verschiedene Alterungsmechanismen aus Abschnitt 2 gleichzeitig auf.

Die Vergiftung von Wasserstoffperoxid auf Platin-katalysatoren wurde in [14] untersucht. Bei hohen Wasserstoffperoxidkonzentrationen werden Stabilisatoren verwendet, die sich auf den Katalysator auswirken. Aufgrund dessen wurden nach Versuchen geringe Mengen von Natrium und Zinn, sowie Phosphor gefunden [14]. Diese Beiprodukte können sich entweder direkt mit den aktiven Platinflächen verbinden oder Poren verstopfen (Verschmutzung).

Die Hüttig-Temperatur von Platin liegt bei 608°C, während die von Aluminium-Oxyd bei 695°C liegt [9]. Die adiabatische Zersetzungstemperatur von 87,5% Wasserstoffperoxid ist bei ungefähr 680°C [15]. Somit liegt die Betriebstemperatur oberhalb der Hüttig-Temperatur des Katalysators und Sinterprozesse sind Teil der Alterungsmechanismen.

Aufgrund der hohen Drücke (>50 bar), die in der Katalysatorkammer wirken, spielt die mechanische Belastung eine Rolle. Nach den Versuchen ist zu beobachten, dass sich die Katalysatormasse geringfügig verändert. Es ist mit mechanischen Schäden zu rechnen. Gleichfalls findet Erosion statt, diese wird durch das Durchströmen des Wasserstoffperoxids durch das Festbett erzeugt.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurden Daten zur Katalysatoralterung aus dem laufenden Testbetrieb mit dem VISERION Triebwerk analysiert. Der BET-Wert und der mittlere Porendurchmesser können ein erster Indikator für das Versagen des Katalysatormaterials sein, wenn der Versagenszustand des Prozesses bekannt ist. Das Porenvolumen eignet sich wenig als Indikator für die Inaktivität. Die aufwendigere Messung der Dispersion ist am Besten geeignet, um eine Aussage bezüglich der Reaktivität des Katalysormaterials zu treffen. Bei großen Massenströmen stellt der Dauerbelastungszustand einen entscheidenden Faktor da, weshalb es Sinn macht, die Parameter über der Einsatzzeit oder der zersetzten Menge an Wasserstoffperoxid aufzutragen.

An Alterungsmechanismen leidet der Katalysator unter Vergiftung, Verschmutzung, thermischen und mechanischen Schäden. Es ist deshalb schwierig Datenreihen mit vielen Messpunkten zu erzeugen. Häufig wird die Lebenszeit des Katalysatormaterials durch mechanische Schäden vorzeitig beendet.

Bei dieser Veröffentlichung wurden große Massenströme von Wasserstoffperoxid analysiert. Die bisher aufgezeigten Daten lassen nur auf erste Anhaltspunkte schließen und es ist notwendig weitere Messpunkte zu sammeln.

Kontaktadresse:

nora.riedel@dlr.de

Literatur

- [1] C. H. Bartholomew. Mechanisms of catalyst deactivation. *Applied Catalysis A: General*, 212, 2001. DOI: [10.1016/S0926-860X\(00\)00843-7](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00843-7).
- [2] Rocketdyne Inc. *Hydrogen Peroxide Handbook*. Air Force Rocket Propulsion Laboratory, 1967. AFRPL-TR-67-144.
- [3] A. Dadiou, R. Damm, and E. W. Schmidt. *Raketentreibstoffe*. Springer Vienna, 1969. ISBN: 978-3-211-80856-6.
- [4] W. Kopacz, A. Okinski, A. Kasztankiewicz, P. Nowakowski, G. Rarata, and P. Makismowski. Hydrogen peroxide - a promising oxidizer for rocket propulsion and its application in solid rocket propellants. *FirePhysChem*, 2(1), 2022. DOI: [10.1016/j.fpc.2022.03.009](https://doi.org/10.1016/j.fpc.2022.03.009).
- [5] S. May, N. M. Bierwagen, G. Poppe, C. Glaser, and A. Ohndorf. Mobile hydrogen peroxide transport and storage container for worldwide rocket launches. In *Space Propulsion Conference 2024*, Glasgow, Schottland, May 2024.
- [6] C. Cottenot, Prévost L. Boust, B., R. Beauchet, Y. Batonneau, and M. Bellenoue. Diameter of spherical alumina pt catalyst: Influence on hydrogen peroxide decomposition performance and catalytic bed ageing. In *Proceedings of the Aerospace Europe Conference 2023 - 10th EUCASS*, Lausanne, Schweiz, 2023.
- [7] P. Forzatti and L. Lietti. Catalyst deactivation. *Catalysis Today*, (52), 1999. DOI: [10.1016/S0920-5861\(99\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(99)00074-7).
- [8] T. W. Hansen, A. T. Delariva, S. R. Challa, and A. K. Datye. Sintering of catalytic nanoparticles: Particle migration or oswald ripening? *Accounts of chemical research*, 46(8), 2013. DOI: [10.1021/ar3002427](https://doi.org/10.1021/ar3002427).
- [9] J. A. Moulijn, A. E. van Diepen, and F. Kapteijn. Catalyst deactivation: is it predictable? what to do? *Applied Catalysis A: General*, 212, 2001. DOI: [10.1016/S0926-860X\(00\)00842-5](https://doi.org/10.1016/S0926-860X(00)00842-5).
- [10] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption - BET method. Standard, Berlin, Deutschland, 2010. DIN ISO 9227:2014-01.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung des Dispersionsgrades von Metallen durch Chemisorption - Teil 1: Grundlagen. Standard, Berlin, Deutschland, 2017. DIN 66136-1:2017-02.
- [12] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Bestimmung des Dispersionsgrades von Metallen durch Chemisorption - Teil 3: Strömungsverfahren. Standard, Berlin, Deutschland, 2007. DIN 66136-3:2007-01.

- [13] A. Dabanovic, J. Martin, S. May, and T. Eggers. Design of a sounding rocket upper stage based on the hybrid rocket engine VISE-RION. *CEAS Space Journal*, 15, June 2023. DOI: [10.1007/s12567-022-00451-2](https://doi.org/10.1007/s12567-022-00451-2).
- [14] H. Quintens, B. Boust, M. Bellenoue, R. Beauchet, and Y. Batonneau. Optimization of a catalytic chamber for H₂O₂ decomposition based on beds. *Journal of Propulsion and Power*, 39(2), March-April 2023. DOI: [10.2514/1.B38697](https://doi.org/10.2514/1.B38697).
- [15] N. Nimmerfroh, D. Pauls, and S. McMahon. Propulse hydrogen peroxide: manufacture, quality, transportation and handling. In *36 th AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, USA, 2000. AIAA-00-3682.