

Treibstoff Temperatur am Starship

Der Tank des Starships ist mit Methan und Sauerstoff gefüllt. Dieser Inhalt muss bis zur Landung am Mars im Tank behalten werden. Denn für die Landung am Mars braucht es einen „landing burn“, und dieser ist nur möglich mit einer Tankfüllung.

Der Tank muss mindestens teilweise gefüllt sein, und das über die gesamte Dauer der Schifffahrt hinweg. Das sind zwischen Erde („Inos“) und Mars („Heres“) bis zu sechs Monate.

Durch die Tankfüllung entsteht im Tank bei einer gegebenen Temperatur T ein gewisser Dampfdruck p des Tankinhaltes. Bei einer gegebenen Temperatur ist der Dampfdruck des Sauerstoffes größer als der des Methans, deshalb macht uns der des Sauerstoffes größere Sorgen. Das Starship ist so konstruiert, dass es einen Innendruck bis zu einem gewissen Grenzwert aushält. Wenn dieser Grenzwert überschritten wird, könnte der Tank beschädigt werden, was zum Austritt des Tankinhaltes führt und damit einen landing burn unmöglich macht. Deshalb ist es unbedingt notwendig, dass der Tankinhalt für die gesamte Reisezeit im Tank bleibt. Deshalb muss der Partialdruck unterhalb eines gewissen Grenzwertes gesenkt werden, also die Temperatur unterhalb eines gewissen Grenzwertes gesenkt werden.

Ich habe nachgelesen (Quelle: Wikipedia), dass bei 100 K der Partialdruck des Sauerstoffes ungefähr 2 bar ist. Das ist eine gerade noch akzeptable Grenze, vor allem da der Partialdruck mit steigender Temperatur etwa exponentiell anwächst. Mit einer Temperaturerhöhung von etwa 10 K steigt der Partialdruck auf das 2-fache. Bei 150 K liegt er bei etwa 50 bar. Deshalb ist es notwendig, dass die Temperatur des Sauerstoffes für die gesamte Reisezeit unter einem Grenzwert von etwa 120 K liegt.

Temperaturkontrolle am Starship

Die Frage ist also nun, wie haltet man große Mengen Methan und Sauerstoff in einem Tank über sechs Monate lang stabil?

Dabei sind die Kosten zu minimieren, das Risiko soll gleich Null sein.

Das Risiko kann minimiert werden, indem auf den Einsatz von Komplexität verzichtet wird. Jede Komplexität bringt Risiko mit sich. Ein rein passives System, das keine beweglichen Teile besitzt und keine Steuerungselektronik besitzt, ist am risikoärmsten, und der einzige Weg, ein Risiko gleich Null zu realisieren. Daher schlage ich vor, ein rein passives Temperatur-Steuersystem am Starship zu installieren.

Der Weg, auf dem die Temperatur am Starship vorwiegend reguliert wird, ist über die Sonneneinstrahlung und die Wärme-Abstrahlung. Wir müssen also diese beiden Faktoren beachten, um die Temperatur zu steuern. Es ist hilfreich, zuerst Formeln für die Wärme-Aufnahme und für die Wärme-Abgabe aufzustellen.

Passive Temperatursteuerung im Tank

Wie wird nun die Temperatur am Starship passiv gesteuert?

Die beiden Faktoren, die den wesentlichen Einfluss haben, sind die Sonneneinstrahlung (Energie-Eingang) und die Wärme-Abstrahlung (Energie-Ausgang). Dies liegt daran, dass die grundlegenden Faktoren, die zur Veränderung von Wärme und damit Temperatur führen, folgende drei sind: Wärmeleitung, Konvektion, Wärmestrahlung. Da die Wärmestrahlung dabei die einzige ist, die ein Vakuum überqueren kann, ist es die einzige Möglichkeit, Wärme am Starship zu regulieren.

Die Wärme verteilt sich jedoch innerhalb des Starship sehr wohl auch durch Konvektion und Konduktion.

Nun wollen wir also berechnen, wie groß die aufgenommene und abgegebene Energiemengen etwa sind:

Der „untere“ Teil des Starships enthält den Sauerstoff-Tank. Er darf eine Temperatur von etwa 100 K nicht überschreiten. Wir nehmen nun an, dass er eine konstante Temperatur von etwa 100 K hat. Für die abgegebene Wärmemenge gilt: $P = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$, wobei ϵ der Abstrahlung-Koeffizient ist (idealerweise schwarze Farbe mit $\epsilon \approx 1$), σ eine Konstante (Stefan-Boltzmann-Konstante) mit dem Wert $5 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$, A die Oberfläche des Tanks (etwa 1000 m^2) und T etwa 100 K.

Nun gilt: $P = 1 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) \cdot 1000 \text{ m}^2 \cdot (100 \text{ K})^4$.

Das ist: $P = 5000 \text{ W}$.

Der Wärmezustrom in den Tank erfolgt vor allem durch die Wärmeleitung aus dem Wohnungsmodul. Der Energietransfer muss dabei eben kleiner oder gleich $P = 5000 \text{ W}$ sein.

Durch eine bauliche Trennung der Wohnmodule vom Tank kann der Wärmetransfer verringert werden. Die Konvektion kann zum Stillstand gebracht werden, die Wärmestrahlung im inneren des Starships durch Verspiegelung der entsprechenden Oberflächen minimiert werden. Die Wärmeleitung kann durch eine Vakuum-Trennung zwischen Wohnmodul und Tank optimiert werden. Es bleibt einzig die Wärmeleitung durch die Außenwände des Starships bestehen. Die Querschnittsfläche des Stahls der Außenwände beträgt zusammengekommen etwa $0,15 \text{ m}^2$. Nach dem Gesetz der Wärmeleitung lässt sich der Wärmefluss berechnen:

$$P_{\text{duct}} = \lambda * A * T_{\text{diff}} / d,$$

wobei P die Wärmeleistung ist, λ ein Materialparameter (für Baustahl: $50 \text{ W} \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$), A die Querschnittsfläche ($0,15 \text{ m}^2$), T_{diff} die Temperaturdifferenz zwischen Wohnmodul und Tank ($T_{\text{diff}} = 300 \text{ K} - 100 \text{ K} = 200 \text{ K}$) und d die Länge des Verbindungsgliedes zwischen Wohnmodul und Tank.

$$\text{Also ist } P_{\text{duct}} = 50 \text{ W} \cdot \text{m} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) * 0,15 \text{ m}^2 * 200 \text{ K} / d \\ = 1500 \text{ W} \cdot \text{m} / d$$

und wir fordern $P_{\text{duct}} \leq P_{\text{rad}}$, wobei $P_{\text{rad}} = 5000 \text{ W}$ aus der vorherigen Berechnung.

Also muss $d \leq 30 \text{ cm}$ sein.

Damit kann eine konstante Temperatur von etwa 100 K im Tank völlig passiv, d.h. ohne Kontrollelektronik und ohne bewegliche Teile, vollbracht werden.