

SPEC-00-STR-SYS-WORMHOLE-SAFETY-0002 — Polar Approach & Full Hazard Hardening (EVOL-00/01) — v0.1.0 DRAFT

Scope: Konstruktive „Safety-by-Design“-Maßnahmen für **DECK 000 / Wormhole** inkl. **Polar-Einflug (Nord/Süd)** sowie ein **vollständiger Hazard-Katalog** für die axialen Systeme (Explosion, Brand, Kollision, Strahlung, MMOD quer/längs, **unkontrollierter Anflug/Impact** u. v. m.). **Bezug:** Stationen **Earth ONE** (Ø 127 m) und **Earth TWO** (Ø 254 m, inkl. Long-Capsule-Varianten).

0) Executive Summary

- **Neuer Top-Hazard:** *Unkontrollierter Anflug/Impact auf die Polar-Einflugborde.* → Gegenmaßnahmen: **POL-GUARD** (mehrlagiger Polar-Prallschutz), **POL-KOS/Kep-Out-Volumes** mit Autopilot-Geofencing, **Polar-Shutter ($\leq 0,5$ s)**, **Deflektions-Jets**, **Jettison/Abort-Prozeduren**, konsequent **radiale Entlastung**.
 - **Safety-Architektur insgesamt:** **Mehrfach-Kompartimentierung in 2D (radial + axial/LAT)**, **inertisierte Technikzonen**, **nicht-brennbare Materialien**, **VENT/BOP nur radial**, **fail-safe geschlossene Schotts/Türen**, **kein Single Point of Failure**.
 - **Härtung gegen Kaskaden:** Explosions-/Brand-Energie **lokal binden**, **Impuls aufnehmen/ableiten**, **Druck & Rauch** in Sekunden **ins All** abführen, **Scheiben/Ringe schließen** – *bevor* das Nächste kippt.
-

1) Designziele (Safety Envelope)

1. **Containment:** Jedes Ereignis bleibt bauabschnittsweise beherrscht (Ring-zu-Ring, Sektor-zu-Sektor).
 2. **Energy-&Mass-Management:** Druck, Rauch, Partikel **radial zur Hülle**; **keine tangentielle** Relief-Führung.
 3. **Fail-Safe:** Türen/Schotts **schließen stromlos**; Aktor-USV ≥ 30 min; Doppelte Sensorik.
 4. **Human Factors:** klare Flucht-/Sammelzonen (Safe-Hold-Nodes), Gegenstrom-Trennung, visuelle/akustische Guidance.
 5. **Testbarkeit:** Alle Schutzfunktionen mit **Zeit- und Kapazitäts-Targets** (Schließzeiten, Vent-A, Inert-Setpoint) verifizierbar.
-

2) Neuer Unfalltyp: Polar-Impact (unkontrollierter Anflug/Einschlag)

2.1 Szenario & Klassen

- **PI-Light:** ≤ 10 t @ ≤ 2 m/s (Klein-Tender/Roboter)
- **PI-Medium:** 10–40 t @ 2–10 m/s (Crew/Cargo-Module)
- **PI-Heavy:** 40–120 t @ 5–20 m/s (Großschiff-Anflugfehler)
- **PI-Extreme:** > 120 t oder > 20 m/s (hoffentlich nur „design to survive, not to save vehicle“)

Parameter: Impuls $J = m\Delta v$, Energie $E = \frac{1}{2}mv^2$. Auslegung erfolgt parametrisiert, nicht fahrzeugspezifisch.

2.2 POL-GUARD - Mehrlagiger Polar-Prallschutz (konstruktiv)

1. **Sensor-Vorhang (Lidar/Radar/Optik):** 3D-Track, Health-Monitoring, Autopilot-Geofencing.
2. **Deploy-Net & Tether-Dämpfer:** ausfahrbares Fangnetz mit vielen **Shock-Absorber-Tethers** (Reißnadeln + viskoelastische Dämpfer). - *Energieaufnahme* $\sim \sum \frac{1}{2} k_i x_i^2$; *Tether-Hub begrenzt Relativ- Δv .*
3. **Crush-Bumper-Kragen:** Ringsegmente aus **Al-Honeycomb/Metal-Foam**; spezifische Energieaufnahme (SEA) **20-60 kJ/kg**. - *Erforderliche Masse* $m_{\text{bumper}} \approx E/SEA$.
4. **Deflection-Cone:** harte, geneigte Prallfläche \rightarrow **Ablenkung out-of-axis**, Fragmente werden **aus dem Wormhole heraus** gelenkt.
5. **Polar-Shutter (0,5 s):** gepanzerte, **guillotine-artige** Innenschotten (Mehrsektor-Lamellen) - schließt die Achse.
6. **VENT/BOP-Kranz:** Sollbruch/Blow-Out-Paneele **hull-nah**; Druck/Partikel **direkt ins All**.

Dimensionierungshilfe (Honeycomb-Bumper): Volumspezifische Absorption $W = \sigma_{\text{crush}} \cdot \varepsilon$. Bei $\sigma \approx 2 \text{ MPa}$, $\varepsilon = 0,5 \rightarrow W \approx 1 \text{ MJ/m}^3$. *Beispiel:* $E = 50 \text{ MJ}$ (z. B. 50 t @ 14 m/s) $\Rightarrow \sim 50 \text{ m}^3$ Crush-Material (auf Sektoren verteilbar).

2.3 POL-KOS/Kep-Out-Volumes & Autopilot-Logik

- **Approach Ellipsoid + Keep-Out Sphere** polar; **Single-Vehicle-Between-Rings** (keine Doppelbelegung).
- **Hard Interlocks:** Bei **KOS-Verletzung** \rightarrow *Station* schließt **Polar-Shutter**, zündet **Deflection-Jets**, aktiviert **Deploy-Net**.

3) Komplett-Hazard-Katalog (DECK 000 / axial)

Mechanisch/Kinetisch

- H-E1: Explosion am Docking-Ring (anliegendes Schiff)
- H-E2: Brand/Flashover an angedocktem Schiff
- H-E3: Fahrzeug-Kollision im Wormhole (axial)
- **H-E4: Polar-Impact (unkontrollierter Anflug/Einschlag)**
- H-E5: Strukturelles Versagen eines Ring-Adapters / Quick-Release
- H-E6: Trümmer/„Runaway“ nach Jettison im Näherungsbereich

Umwelt/Exogen

- H-U1: **Sonnenwind/SPE/CME** (Strahlungs-Spike)
- H-U2: **MMOD quer** (seitlicher Durchschlag Tubus/Ring)
- H-U3: **MMOD längs** (axial entlang der Achse)
- H-U4: Weltraumschrott-Schwarm (Kollisionskaskaden-Risiko)

Prozess/Medien

- H-P1: O₂-Anreicherung / Inertgas-Fehlfunktion
- H-P2: Kryo-Leck (H₂/O₂/N₂/Ar) \rightarrow Kälte/EX-Risiken
- H-P3: Batterie-Thermal-Runaway (Carrier/Andock-Vehikel)
- H-P4: Giftige Medien (NH₃/Monosilan etc.) aus Nutzlast

Systemisch/OPS/IT

- H-S1: Stromausfall/USV-Versagen der Aktoren
- H-S2: Sensorik-Blindheit (Radar/Lidar/Optik)
- H-S3: **Cyber/Spoofing** (GN&C/Transponder/Beacons)

- H-S4: Human-Factor (Fehlerhafte Freigabe/Prozedur)
- H-S5: Software-Regression (Update bricht Interlocks)

Für jeden Hazard führen wir **S (Severity 1-5)**, **L (Likelihood A-E)**, **R = S×L**, **Mitigation (Design/OPS)**, **V&V** in einer Tabellen-SSOT (CSV) – bereit zum Risikoreview.

4) Design-Maßnahmen (Layered Hardening)

4.1 Kompartimentierung & Schotts

- **Ring-zu-Ring**: PT-A (Haupt), PT-B (Service), AL-C (Airlock) – *fail-safe* zu, kaskadierbar; Δp -Rating ≥ 1 atm sektorweise.
- **LAT-Scheiben (axial)**: schließen **S40/EQ/N40** (EVOL-01) → **Rauch/Heißgas-Kappen**, kein Voll- Δp (Equalizer).

4.2 VENT/BOP

- **Nur radial** zur Hülle; dimensioniert auf **choked flow**. $\dot{m} = C_d A P_0 \sqrt{\frac{\gamma}{RT}} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \rightarrow$ **A_VENT** je Ring so, dass $p \rightarrow p_{\text{safe}}$ in **Δt_{max}** (Stationsziel, z. B. $\leq 3-5$ s).

4.3 Feuer & Inertisierung

- **Ar/N₂-Flutung** ringweise; O₂-Setpoint $\leq 12-15$ Vol-% in $\leq N$ s; nicht-brennbare Auskleidung, EX-Zonierung.

4.4 Fenster/MDPS/Shutter

- Multilayer-Stacks, **Shutter** $\leq 0,5$ s für E4/E5/E6 (SPE/MMOD), außen **MDPS-Shades**.

4.5 Docking-Ringe (Blast/Quick-Release)

- **Opfer-Zonen** (frangible) + **Blast-Cradle** (Sandwich-Kragen), **Jettison** mit Rückzugs-Shutter; integrierte **Deflektoren**.

4.6 Neu: POL-GUARD am Polar-Einflug

- **Deploy-Net + Tethers, Crush-Bumper, Deflection-Cone, Polar-Shutter, VENT-Kranz** – s. 2.2.

4.7 Traffic-Separation & Interlocks

- **Nord = Arrivals, Süd = Departures, Ein-Fahrzeug-Slot zwischen zwei Ringen**, GN&C-Beacon-Pflicht, „rogue transponder“ → sofortige **POL-Shutter**-Schließung + **Deflection-Jets**.

4.8 Cyber-Resilienz

- Out-of-Band-Beacons, **AuthN/AuthZ** für Freigaben, Air-Gap für Safety-PLC, „last-known good“-Rollback.
-

5) Parametrische Auslegung (Formeln)

5.1 Polar-Bumper (Crush-Energie)

- **Eingang:** $m, v \rightarrow E = \frac{1}{2}mv^2$.
- **Bumper-Bedarf:** $V_{\text{crush}} \approx E/W$ mit W (MJ/m³) aus Materialdaten.
- **Masse-Daumen:** $m_{\text{bumper}} \approx E/SEA$ (SEA=20-60 kJ/kg).

5.2 Fangnetz + Tethers

- **Zielhub** x pro Tether; **Energie** $E \approx \sum \frac{1}{2}k_i x_i^2$.
- **Grenzlast** $\rightarrow F_{\text{max}} = \sum k_i x_i \leq$ stationäre Grenzkraften (Ankerpunkte).
- *Praktisch:* 8-16 Tethers, je **viskoelastischer Dämpfer** (Hysterese) + Reißelement („fuse“) zur Lastspitzenbegrenzung.

5.3 Polar-Shutter (Impuls)

- **Impulsreserve:** $J_{\text{shutter}} \geq m\Delta v$ der zu erwartenden Fragmentlast *auf den Schließweg*.
- **Schließzeit:** $t_{\text{shut}} \leq 0,5$ s bei **E4/E5/E6**-Trigger; Kraft-/Leistungsbudget ergo dimensionieren.

6) Prüf- & Abnahmekriterien (V&V)

- **PT-A/PT-B/AL-C:** Schließzeit lokal ≤ 3 s, kaskadiert ≤ 8 s; Dichtheit $\Delta p \geq 1$ atm (Ring-Weise).
- **VENT/BOP:** Nachweis $A_{\text{VENT}} \rightarrow p \downarrow p_{\text{safe}}$ in Δt_{max} ; Funktions-Drills (kalte Gas-Runs + CFD).
- **Shutter:** 100 % End-to-End-Tests (SPE/MMOD/Polar-Alarm) mit High-Speed-Log; Ziel $\leq 0,5$ s.
- **POL-GUARD:** Drop-/Schlitten-Versuche (E-Klassen), Netz-Schlusstests, Tether-Dämpfer-Charakteristik, Cone-Deflection-Mapping.
- **Cyber:** Red-Team-Tests (Spoofing/Replay), Safety-PLC-Failover.

7) Risiko-Matrix (Beispiel-Ausschnitt)

Hazard	S (1-5)	L (A-E)	R	Primär-Mitigation
H-E1 Explosion Dock	5	C	H	Ring-Containment, VENT/BOP, Quick-Release
H-E4 Polar-Impact	5	B-C	H	POL-GUARD, Shutter, KOS, Deflection
H-U3 MMOD längs	4	C	H	Shutter-Kaskade, Spall-Liner
H-S3 Cyber/Spoof	4	C	H	AuthN/PLC-Air-Gap, OOB-Beacons
H-P2 Kryo-Leck	4	C	H	EX-Zonen, Inert, VENT

(Vollständige Matrix als CSV/SSOT führen.)

8) Umsetzung & Roadmap

- **EVOL-00 (127 m):** Polar-Shutter + KOS sofort; **POL-GUARD (light)** (Crush-Kragen + Net).
 - **EVOL-01 (254 m Kugel):** **POL-GUARD (medium)** + Deflection-Cone + stärkere VENT/BOP-Kranz.
 - **EVOL-01 Long Capsule:** **POL-GUARD (heavy)** + 2. Fußring im Core; Dock-Throats auf $\geq 16\text{--}20$ m, wenn Innendocking.
-