

Hochschule Ruhr West
Fachbereich 4, Institut Naturwissenschaften
Gruppe Sicherheitstechnik
Uwe Kay Rakowsky (Prof. Dr.-Ing.)



Zuverlässigkeitsanalyse eines Bohr-Moduls mit Vergleich der
Einflussfaktoren für konventionelle und Raumfahrt-Anwendungen

Bachelorarbeit



Rico Kösters

M.-Nr. 10010690

Erstprüfer Uwe Kay Rakowsky (Prof. Dr.-Ing.)

Zweitprüfer Larissa Perlitz (M. Sc.)

Ausgabe des Themas 2022-01-21

Abgabe der Arbeit 2022-04-15

Version

BA-2022_Kösters_Rico im Ausdruck vom 2022-04-15

Titelbild [1]

Inhalt

1	Einleitung	5
1.1	Kontext und Szenario.....	5
1.2	Zielsetzung und Struktur.....	5
2	Grundlagen.....	7
2.1	Glossar	7
2.2	Abkürzungen.....	7
2.3	Symbole	8
2.3.1	Ausfallraten	8
2.3.2	Dauern	8
2.3.3	Weitere Symbole	9
2.3.4	Zeiten	12
3	Standortgegebenheiten	13
3.1	Szenario.....	13
3.2	Mond.....	13
3.3	Erde	14
4	Zuverlässigkeitsanalyse NSWC-10.....	15
4.1	Bohrmodul	15
4.2	Ausfallrate Kugellager	15
4.3	Ausfallrate Welle	19
4.4	Ausfallrate Elektromotor.....	21
4.5	Ausfallrate Dichtung	23
4.6	Ausfallrate Bohrer.....	25
4.7	Gesamtausfallrate.....	26
5	Zuverlässigkeitsanalyse FIDES.....	28
5.1	Allgemeines Zuverlässigkeitsmodell	28
5.2	Phasenmodellierung Erde	29
5.3	Phasenmodellierung Mond	33
5.4	Spezifisches Zuverlässigkeitsmodell	33
5.5	Alternative Vorgehensweise	37
6	Auswertung	39
6.1	NSWC-10.....	39
6.2	FIDES.....	39
7	Zusammenfassung	41
8	Ausblick.....	43

9 Referenzen 44

Anhang..... 47

1 Einleitung

Mit dieser Arbeit sollen unterschiedliche Einflussfaktoren und deren Auswirkung auf die Zuverlässigkeit der mechanischen und elektrischen Bauteile eines Bohrmoduls aufgezeigt und miteinander verglichen werden. Dazu werden zwei Zuverlässigkeitsanalysen mit je zwei verschiedenen Szenarien durchgeführt und ausgewertet.

1.1 Kontext und Szenario

Das Szenario basiert auf der von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) geplanten Mission die Mondoberfläche und ihre oberen Gesteinsschichten zu analysieren. Zur Bewältigung dieser Aufgabe soll ein mobiler Roboter mit einem Bohrmodul ausgestattet werden, um an unterschiedlichen Orten auf der Mondoberfläche Bodenproben zu analysieren. Es sollen die Bohrungen bis zu einem Meter Tiefe durchgeführt werden. Ziel der Mission soll sein, die Geologie des Mondes zu erforschen [1].

Dieses Szenario dient als Grundlage die Zuverlässigkeit des Bohrmoduls unter extremen Bedingungen zu ermitteln. Dabei stellt sich die Frage danach, welchen Einfluss verschiedene Temperaturen und weitere Faktoren auf die Zuverlässigkeit des Bohrmoduls haben.

1.2 Zielsetzung und Struktur

Das Ziel dieser Arbeit ist die Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse eines Bohrmoduls unter Hinzunahme zwei verschiedener Standards unterschiedlicher Herangehensweise. Dabei gibt jeder Standard eine andere Art der Durchführung vor. Dabei ist das NSWC-10 stark abhängig von den konstruktiven Eigenschaften, der FIDES von den vorherrschenden Umweltgegebenheiten. Die Analysen der Zuverlässigkeit des Bohrmoduls werden sowohl für ein Erdszenario als auch für ein Mondszenario mit ihren jeweiligen unterschiedlichen Gegebenheiten durchgeführt. Während der Analysen werden weitere Einflussfaktoren in den Berechnungen berücksichtigt, die in den Standards als solche nicht aufgeführt werden. Zu diesen zählen unter anderen die Temperaturschwankung auf dem Mond und das dort vorherrschende Vakuum. Diese finden Berücksichtigung, um die extremen Bedingungen des Mondszenarios besser repräsentieren zu können. Letztlich werden die beiden Standards hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf jene Szenarien bewertet, die ermittelten Ausfallraten erläutert und die Einflussfaktoren miteinander verglichen.

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit des Moduls werden vorab die Szenarien definiert und die konstruktiven Eigenschaften der Bauteile ermittelt. Anschließend wird die erste Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe des NSWC-10 durchgeführt. Dazu werden die einzelnen Ausfallraten der Bauteile bestimmt und verglichen. Neben den vorgegeben Einflussfaktoren werden, falls möglich, spezifische Gegebenheiten des Szenarios auf dem Mond einbezogen und diskutiert. Die zweite Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt auf der Grundlage des FIDES. Vorab werden dazu die einzelnen Betriebszustände eines Tages definiert, welche als Grundlage für die weiteren Berechnungen dienen. Es wird versucht, den Tagesablauf des Roboters so präzise wie möglich zu simulieren. Anschließend kann die Ausfallrate des Bohrmoduls in Abhängigkeit der vom FIDES vorgegebenen Einflussfaktoren ermittelt werden. Letztlich werden die ermittelten Werte

der beiden Standards miteinander verglichen, sowie mögliche Grenzen und Problematiken der Standards aufgezeigt.

2 Grundlagen

2.1 Glossar

Basic failure rate	Grundaussfallrate [14]
Endurance Limit	Ermüdungsgrenze; Maximale Spannung, unterhalb derer angenommen werden kann, dass das Material eine unbestimmte Anzahl von Belastungszyklen standhalten kann [14]
Failure	Ausfall (IEV 192-03-01) [2]; Verlust der Fähigkeit, die geforderte Leistung zu erbringen
Failure rate	Ausfallrate [14]
Modulus of Elasticity	Elastizitätsmodul; Maß für die Steifigkeit von Metall [14]
Operating time	Betriebszeit (IEV 192-02-05) [2]; Zeitintervall, in dem sich ein Element in einem Betriebszustand befindet
Operating time to failure	Betriebszeit bis zum Ausfall (IEV 192-05-01) [2]
Reliability	Zuverlässigkeit (IEV 192-01-24) [2]
Surface finish	Oberflächenbeschaffenheit; Maß für Rauheit einer Oberfläche als Ergebnis der Endbearbeitung [14]
Tensile Strength	Zugfestigkeit; Wert der Nennspannung in Abhängigkeit der maximalen Last und Querschnittsfläche [14]
Total failure rate	Gesamtausfallrate [14]
Up state	Betriebsfähiger Zustand (IEV 192-02-01) [2]; Zustand, in dem die geforderte Leistung erbracht wird
Viscosity	Viskosität; Einheit des Innenwiderstand einer Flüssigkeit, der sie am Fließen hindert [14]

2.2 Abkürzungen

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DDV	Durée de vie, Lebensdauer
FIT	Failure in Time
FIDES	Reliability Methodology for Electronic Systems
MU	Maintenance Unit
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NSWC-10	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment
SiO ₂	Siliziumdioxid

2.3 Symbole

2.3.1 Ausfallraten

λ	Total failure rate, Gesamtausfallrate des Moduls (Im Zusammenhang mit dem NSWC-10)
λ	Item failure rate, Ausfallrate, (Im Zusammenhang mit der FIDES)
λ_{AS}	Failure rate of the armature shaft, Ausfallrate Welle
λ_B	Ausfallrate Bohrer
λ_{BE}	Failure rate of bearing, Ausfallrate Kugellager
$\lambda_{BE,B}$	Bearing base failure rate, Grundaufallrate Kugellager
λ_{BS}	Failure rate of brushes, Ausfallrate Bürste
λ_{Cst}	Constant failure rate, Konstante Ausfallrate
λ_{GR}	Failure rate of gears, Ausfallrate Zahnrad
λ_M	Total failure rate for the motor system, Ausfallrate Elektromotor
$\lambda_{Physical}$	Failure rate due to physical contribution, Ausfallrate in Abhängigkeit physischer Einflussfaktoren
λ_{SE}	Failure rate of dynamic seal, Ausfallrate Dichtung
$\lambda_{SE,B}$	Base failure rate of dynamic seal, Grundaufallrate Dichtung
λ_{SH}	Shaft failure rate, Ausfallrate Welle
$\lambda_{SH,B}$	Shaft base failure rate, Grundaufallrate Welle
λ_{ST}	Failure rate of the stator housing, Ausfallrate Statorgehäuse
$\lambda_{Wear\ out}$	Random failure rate, Ausfallrate in Abhängigkeit des Verschleißes
λ_{WI}	Failure rate of electric motor windings, Ausfallrate Wicklungen
$\lambda_{WI,B}$	Base failure rate of electric motor windings, Grundaufallrate Wicklungen
λ_0	Basic failure rate of the item, Grundaufallrate
λ_{0_Fan}	Basic failure rate, Grundaufallrate Ventilator
λ_1	Ausfallrate
λ_2	Ausfallrate

2.3.2 Dauern

DDV	Durée de vie, Lebensdauer [Betriebsstunden]
$DDV_{calendar}$	Durée de vie, Summe der Lebensdauern des Moduls [Betriebsstunden]
L_B	Lebensdauer [m/bit]
L_I	Nominelle Lebensdauer [Betriebsstunden]
L_{10}	Bearing life with reliability of 90 %, Nominelle Lebensdauer [10^6 Umdrehungen]
L_{10h}	Bearing life (at 90 % reliability), Nominelle Lebensdauer [Betriebsstunden]
L_{cycle}	Nominelle Lebensdauer [10^9 Umdrehungen]
L_{hours}	Nominelle Lebensdauer [Betriebsstunden]
T	Lebensdauer in Abhängigkeit von L_B [Betriebsstunden]

t_B	Lebensdauer [Betriebsstunden]
T_B	Lebensdauer [Betriebsstunden]
θ_{cy}	Cycle duration, Zyklusdauer

2.3.3 Weitere Symbole

B	Noise, Lautstärke
C_{alt}	Multiplying factor which considers the effects of operation at extreme elevations, Höhenfaktor
C_{DY}	Shaft displacement multiplying factor, Wellenversatzfaktor
C_f	Surface Finish Multiplying Factor, Oberflächenbeschaffenheitsfaktor
C_f	Shaft surface finish multiplying factor, Oberflächenbeschaffenheitsfaktor
C_N	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate, Verunreinigungs faktor
C_{PV}	Multiplying factor which considers the effect of the pressurevelocity coefficient on the base failure rate, Druckgeschwindigkeitsfaktor
C_Q	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate, Faktor in Abhängigkeit des maximal zulässigen Austritts des Schmiermittels
C_{SF}	Multiplying factor for operating service conditions, Servicefaktor
C_{SC}	Stress concentration factor for shaft discontinuities, Kerbwirkungsfaktor
$C_{SC,G}$	Stress concentration factor due to shaft grooves, Spannungskonzentrationsfaktor aufgrund von Wellennuten
$C_{SC,R}$	Stress concentration factor due to transition between shaft sections, Spannungskonzentrationsfaktor aufgrund von Übergängen zwischen Wellenabschnitten
C_t	Multiplying factor for operating temperature, Temperaturfaktor
C_T	Material temperature multiplying factor, Temperaturfaktor
C_T	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate, Umgebungstemperaturfaktor
C_T	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate, Temperaturfaktor
C_{CW}	Lubricant Contamination Multiplying Factor, Faktor (Prozentualer Wasseranteil im Schmiermittel)
C_V	Multiplying factor for lubricant, Viskositätsfaktor
C_V	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations, Spannungsfaktor
C_V	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate, Viskositätsfaktor
CW	Percentage of water in the lubricant, Prozentualer Wasseranteil im Schmiermittel

C_0	System filter size, Filtergröße
d	Transitioned shaft diameter, Durchmesser
d_1	Durchmesser (Abschnitt 1)
d_2	Durchmesser (Abschnitt 2)
D	Initial shaft diameter, Durchmesser
E	Modulus of elasticity of shaft material, Elastizitätsmodul
Ea	Factor depending on bearing type, Faktor abhängig der Lagerart
f	Coefficient of friction, Reibungskoeffizient
F	Shaft weight, Gewicht der Welle
F_A	Axial load, Axiale Belastung
F_R	Radial load, Radiale Belastung
GPM_R	Rated flow, Durchflussmenge
G_{RMS}	Stress associated with each random vibration phase, Beanspruchung durch zufällige Vibrationen
I	Moment of inertia, Trägheitsmoment
l	Shaft length, Länge der Welle
l_1	Wellenlänge (Abschnitt 1)
l_2	Wellenlänge (Abschnitt 2)
L_A	Equivalent dynamic load, Dynamisch äquivalente Lagerbelastung
L_B	Lebensdauer [m/bit]
L_S	Basic dynamic load rating, Dynamische Tragzahl
m	Factor depending on bearing type, Faktor abhängig der Lagerart
MC	Corrective Maintenance, Durchschnittliche Dauer zwischen zwei Wartungen aufgrund von Verschleiß
MPP	Periodic Preventative Maintenance, Durchschnittliche Dauer zwischen zwei periodisch präventiven Wartungen
n	Rotational speed, Nenndrehzahl
$N_{annual-cy}$	Number of cycles associated with each cycling phase over a year, Anzahl der Zyklen pro Jahr
N_{10}	Number Particles Under 10 Micron Per Hour, Anzahl der Partikel unter 10µm in der Stunde
$Pmarks_k$	Weighting factors corresponding to marks assigned to each criterion, Gewichtungsfaktor
Pos_k	Weight for each criterion, Gewichtung
QA_{item}	Factor of item quality assurance, Faktor in Abhängigkeit der Qualitätssicherung des Bauteils
Q_f	Allowable Leakage, Maximal zulässiger Austritt des Schmiermittels
$QM_{manufacturer}$	Factor of the manufacturer's quality assurance, Faktor in Abhängigkeit der Qualitätssicherung des Herstellers

r	Radius of fillet, Radius des Freistichs
Ra	Mittelrauwert
$RH_{ambient}$	Humidity associated with a phase, Relative Luftfeuchtigkeit
RMS	Surface finish, Oberflächenbeschaffenheit
Rz	Rautiefe
t	Temperaturdifferenz
T	Temperature close to the bearing in the phase considered, Temperatur nahe dem Kugellager
$T_{ambient}$	Environment temperature considered, Umgebungstemperatur
$T_{max-cycling}$	Maximum board temperature during a cycling phase, Maximale Temperatur des Zyklus
T_r	Temperature rating of windings, Temperaturklassifizierung der Wicklungen
T_R	Rated Temperature of Seal, Empfohlene Gebrauchstemperatur
T_S	Tensile strength, Zugfestigkeit
T_0	Operating Temperature of the Bearing, Temperatur des Kugellagers
T_0	Internal motor temperature during operation, Tatsächliche Temperatur des Elektromotors
T_0	Operating Temperature of Seal, Tatsächliche Temperatur während des Gebrauchs
ν	Dynamic viscosity of fluid being used, Dynamische Viskosität
V	Rotation speed, Drehzahl
V_L	Viscosity of lubricant used, Viskosität des Schmiermittels
V_0	Viscosity of specification lubricant, Geforderte spezifische Viskosität
y	Constant, Konstanter Faktor (Lagerart)
α_1	Correlation factor, Korrelationsfaktor
β	Weibull shape factor, Weibull-Formfaktor
$\Delta T_{cycling}$	Thermal amplitude of the cycle, Temperaturamplitude eines Zyklus
δ_1	Correlation factor, Korrelationsfaktor
δ_2	Correlation factor, Korrelationsfaktor
ε	Factor of purchaser's experience with his supplier, Faktor zur Erfahrung des Zulieferers
γ_M	Faktor in Abhängigkeit der mechanischen Beanspruchung
γ_{Rh}	Faktor in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit
γ_{Cy}	Faktor in Abhängigkeit der Temperaturschwankung
γ_{Th}	Faktor in Abhängigkeit der Temperatur
$\Pi_{acceleration}$	Acceleration factor, Belastungsfaktor unter normalen Bedingungen
$\Pi_{Application}$	Factor contributing to overstress, Faktor in Abhängigkeit der Anwendungsumgebung
$\Pi_{induced}$	Factor for contribution of overstress, Überbeanspruchungsfaktor

$\Pi_{induced-i}$	Factor for contribution of overstress, Überbeanspruchungsfaktor
$\Pi_{Mechanical}$	Factor contributing to physical stress (Mechanical), Mechanischer Einflussfaktor
$\Pi_{Placement}$	Factor contributing to overstress, Faktor in Abhängigkeit der Item-Platzierung
Π_{PM}	Part manufacturing factor, Faktor in Abhängigkeit der Qualität und technischen Kontrolle des Herstellers für Bauteile
$\Pi_{Process}$	Process factor, Faktor in Abhängigkeit der Qualität und technischen Kontrolle des Herstellers für Bauteile, in denen dieses Bauteil verbaut ist
Π_{RH}	Factor contributing to physical stress (Humidity), Faktor in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit
$\Pi_{Ruggedising}$	Factor contributing to overstress, Faktor in Abhängigkeit zur Berücksichtigung der Überbeanspruchung in der Entwicklung
Π_{Tcy}	Factor contributing to physical stress (Temperature cycling), Faktor in Abhängigkeit der Temperaturschwankung
$\Pi_{Thermal}$	Factor contributing to physical stress (Thermal), Faktor in Abhängigkeit der Temperatur
$\Pi_{Thermo-electrical}$	Factor contributing to physical stress (Thermo-electrical), Faktor in Abhängigkeit der Temperatur
Π_{Type}	Factor depending on bearing type, Faktor abhängig der Lagerart

2.3.4 Zeiten

t_{annual}	Time associated with phase over a year, Gesamtzeit der Zyklen pro Jahr
t_{annual_phase}	Time spent per year in each identified phase, Gesamtzeit der Zyklen pro Jahr

3 Standortgegebenheiten

3.1 Szenario

Das Szenario beinhaltet die Platzierung von sechs autark arbeitenden Robotern und einer Instandhaltungseinheit, nachfolgend MU genannt, auf der Mondrückseite. Ziel dieser Roboter ist es, an verschiedenen Stellen mit Hilfe eines Bohrmoduls Gesteinsbohrungen durchzuführen. Die MU dient als Anlaufstelle der Roboter bei Bauteilausfällen zur Wiederherstellung eines betriebsfähigen Zustands (*Up state*) [3].

3.2 Mond

Auf der Mondoberfläche herrschen je nach Tageszeit in der Nähe des Äquators Temperaturen von $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Nacht bis zu $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ am Tag. Dabei ist zu beachten, dass der Tag und die Nacht des Mondes aufgrund der Eigenrotation je 14 Erdtage (336 Stunden) andauern. In Einzelfällen können in den Kratern des Mondes Temperaturen von bis zu $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftreten [4].

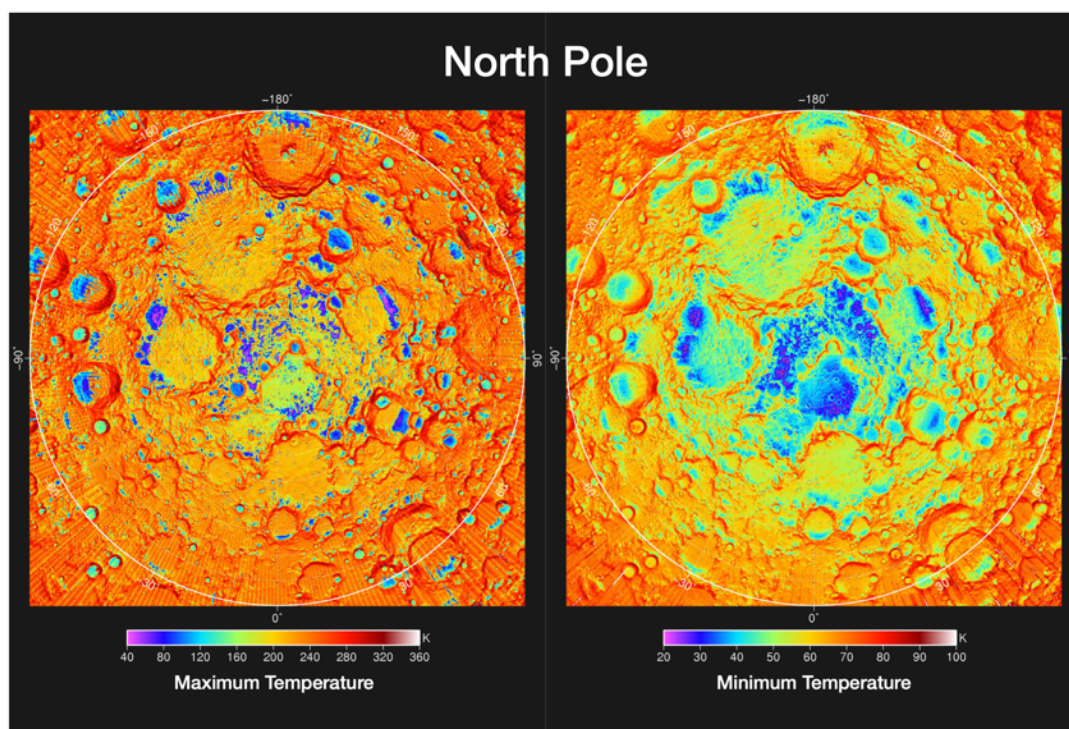


Abbildung 1: Temperaturen der Mondoberfläche tagsüber (links) und in der Nacht (recht) [4].

Das Material, in dem die Bohrung erfolgen soll, hat einen Einfluss auf die Lebensdauer des Bohrers [5]. Folglich wird zunächst die Beschaffenheit der 70 bis 150km dicken Mondkruste betrachtet, wie beispielsweise die Zusammensetzungen des Gesteins und die mittlere Dichte [6]. Einfachheitshalber wird eine mittlere Dichte der Mondkruste von 2550 kg m^{-3} für das Szenario angenommen [7]. Den größten Anteil der chemischen Zusammensetzungen des Mondgesteins in nahezu allen Regionen nimmt der Sauerstoff ein. Unterschiede sind besonders bei einem Vergleich von Hochland und Mare zu beobachten. So macht Silizium in den Maria den zweithöchsten prozentualen Anteil gefolgt von Eisen. Im Hochland ist der

Siliziumgehalt ähnlich hoch, jedoch kann der Aluminiumgehalt deutlich über dem Eisengehalt liegen. Im Durchschnitt liegt der Siliziumdioxidgehalt bei 43,4 % [8].

Aufgrund der nicht vorhandenen Atmosphäre und einer Gasmenge von $3 \cdot 10^{-14} \text{ kg/cm}^2$ existiert auf der Mondoberfläche ein Ultrahochvakuum [9]. Zum Vergleich ist die Gasmenge der Erde mit 1 kg/m^2 um ein Vielfaches größer als auf dem Mond [9]. Der Druck beträgt $2 \cdot 10^{-12}$ Torr [10]. Der Großteil der Mondatmosphäre setzt sich aus Helium, Neon, Wasserstoff und Argon zusammen. Durch den fehlenden Sauerstoff in der Atmosphäre beträgt die Luftfeuchtigkeit 0 % und fällt somit als möglicher Einflussfaktor auf die Zuverlässigkeit (*Reliability*) des Bohrmodul weg [10].

3.3 Erde

Als Vergleichsszenario auf der Erde wird das außenliegende Testfeld des DLR in Oberpfaffenhofen verwendet. Jenes soll der Mondlandschaft ähneln und somit Mondmissionen bestmöglich widerspiegeln. Die vorliegenden Klimadaten zum Standort Oberpfaffenhofen werden unter anderem als Referenz für die Ermittlung der Ausfallraten (*Failure rate*) und der Phasenmodellierung herangezogen [11,12] Die exakte Ermittlung der verwendeten Daten erfolgt in Abschnitt 5.2.

4 Zuverlässigkeitsanalyse NSWC-10

4.1 Bohrmodul

Das Bohrmodul wird durch einen elektrischen Wechselstrommotor ohne Getriebe angetrieben. Dabei beinhaltet der Motor weitere Bauteile, wie Rillenkugellager und eine Welle. Der Motor wird dabei vertikal und mit dem Austritt der Welle nach unten hin an dem Roboter positioniert. Die Welle wird mit Hilfe von zwei Rillenkugellagern geführt, zusätzlich beinhaltet das Modul einen Dichtring. Zur Berechnung der Ausfallraten müssen einige Daten anhand eines ähnlichen Szenarios geschätzt werden. Der Bohrer soll sich mit einer Geschwindigkeit von 85 Umdrehungen pro Minute drehen und einen Durchmesser von 50mm besitzen [13].

Die Temperatur des Elektromotors und dessen Bauteilen kann aufgrund des Mangels an Informationen lediglich geschätzt werden. Der NSWC-10 gibt für Elektromotoren eine Temperaturklassifizierung von 105 °C an [14]. Die Temperatur während der Bohrphase muss aufgrund fehlender Informationen geschätzt werden und wird unterhalb dieser Klassifizierung angesetzt. Die Temperatur soll 95 °C betragen. Ausgehend von einer Referenztemperatur von 20 °C beträgt der Temperaturanstieg dementsprechend 75 °C. Dieser Temperaturanstieg soll für alle folgenden Szenarien gelten. Die maximale Temperatur der Bauteile kann demnach im MondszENARIO 195 °C am Tag und -55 °C in der Nacht erreichen. Aufgrund der starken Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht des Mondszenarios werden für das MondszENARIO zwei Ausfallraten berechnet.

4.2 Ausfallrate Kugellager

Im folgenden Abschnitt wird die nominelle Lebensdauer eines Rillenkugellagers und die Ausfallrate in Abhängigkeit von Temperatur, Beschaffenheit des Schmiermittels und den Verwendungsszenarien ermittelt. Für die Lagerung der Welle wird ein einreihiges Rillenkugellager von der Firma SKF mit einem Bohrungsdurchmesser von 65mm und einem Außendurchmesser von 100mm angenommen [15].

Die Ausfallrate λ_{BE} [failures/million revolutions] eines Rillenkugellagers setzt sich aus fünf verschiedenen Faktoren zusammen:

$$\lambda_{BE} = \lambda_{BE,B} * C_V * C_{CW} * C_t * C_{SF} \quad (1)$$

$\lambda_{BE,B}$ [failures/million revolutions] ist die Grundaufallrate (*Basic failure rate*) eines Rillenkugellagers unter Einbezug der dynamischen und radialen Belastungen.

$$\lambda_{BE,B} = \frac{2 * 10^5}{L_{10}} \quad (2)$$

Dabei repräsentiert L_{10} [10^6 Umdrehungen] die nominelle Lebensdauer eines Rillenkugellagers.

$$L_{10} = \left(\frac{L_S}{L_A} \right)^y \quad (3)$$

Die dynamische Tragzahl L_S [kN] ist durch den Hersteller des Rillenkugellagers gegeben und kann übernommen werden. In diesem Fall beträgt L_S 31,90 kN [15]. Der Faktor y ist abhängig von der Lagerart und besitzt für Rillenkugellager einen Wert von 3. Zur Berechnung der dynamisch äquivalenten Lagerbelastung L_A [kN] werden die Werte für die axialen Belastungen F_A [kN], radialen Belastungen F_R [kN] und die dazugehörigen Radial- und Axialfaktoren jenes Kugellagers benötigt. Aufgrund der fehlenden Belastungsangaben F_A und F_R muss L_{10} geschätzt werden. Dafür wird der für die nominelle Lebensdauer L_{10h} [Betriebsstunden] empfohlene Richtwert und die Nenndrehzahl n [min^{-1}] des Elektromotors zur Hilfe genommen. Für Serielektromotoren beträgt L_{10h} 26.500 Stunden, die Nenndrehzahl n beträgt, angelehnt an die Drehzahl des Bohrers, 85 [16,17,13]. L_{10} wird ermittelt durch:

$$L_{10} = L_{10h} \div \frac{10^6}{60 * n} \quad (4)$$

wobei

$$L_{10h} = L_{10} * \frac{10^6}{60 * n} \quad (5)$$

Die nominelle Lebensdauer L_{10} beträgt demnach 135,15 [10^6 Umdrehungen].

Durch Einsetzen der oben ermittelten Werte in Gleichung (2) ergibt sich eine Grundaussfallrate von $\lambda_{BE,B} = 1,48 * 10^{-3}$ [failures/million revolutions].

Nachdem die nominelle Lebensdauer L_{10} und die Grundaussfallrate $\lambda_{BE,B}$ des Rillenkugellagers in Abhängigkeit der Nenndrehzahl und der nominellen Lebensdauer bestimmt wurde, können anschließend weitere Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Der Faktor C_V berücksichtigt die Viskosität (*Viscosity*) des verwendeten Schmiermittels V_L [lb-min/in^2] in Relation zur geforderten spezifischen Viskosität V_0 [lb-min/in^2] des Schmiermittels. Da das mögliche Ergebnis nach Abbildung 7.1 (siehe [14]) zwischen 0,30 und 1,45 liegen kann, wird C_V im Erdszenario auf den Mittelwert von 0,88 geschätzt [14].

$$C_V = \left(\frac{V_0}{V_L} \right)^{0,54} \quad (6)$$

Für das MondszENARIO wird der Festschmierstoff Molybdändisulfid (MoS_2) verwendet, da dieser für Anwendungen im Vakuum geeignet ist [18]. Gleichzeitig eignet sich dieser besser für tiefe Temperaturen als herkömmliche Schmierstoffe [19]. Da für Molybdändisulfid keine dynamische Viskosität ermittelt werden kann, muss der Faktor C_V geschätzt werden. Da zur exakten Bestimmung von C_V nicht genügend Daten

vorliegen, wird jener Wert unter der Annahme des ungünstigsten Falls konservativ auf den größtmöglichen Wert von 1,45 laut Abbildung 7.1 (siehe [14]) geschätzt [14].

C_{CW} beschreibt den Faktor, welcher den prozentualen Wasseranteil im Schmiermittel repräsentiert. Je niedriger der Wassergehalt im Schmiermittel, desto geringer ist der Einfluss auf die Ausfallrate λ_{BE} .

$$C_{CW} = 1,04 + 1,03 * CW - 0,065 * CW^2 \quad (7)$$

Da der Hersteller keine Angaben zum prozentualen Wasseranteil im Schmiermittel CW macht, muss der Wert für das Erdszenario auf 2250ppm (0,225 %) geschätzt werden [20]. Bei einem prozentualen Wasseranteil im Schmiermittel von 0,225 % beträgt somit der Faktor C_{CW} 1,27. Bei Verwendung von Molybdändisulfid, welches keinen Wasseranteil aufweist, beträgt C_{CW} 1,04. Abbildung 2 zeigt den Reibungskoeffizienten f in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks eines Kugellagers mit Molybdändisulfid-Schmierung. Auffällig dabei ist, dass sich f mit 0,15 bei 760 Torr im Erdszenario auf 0,04 bei einem Druck kleiner als 100 [Torr] verringert. Der Reibungskoeffizient ist im Mondszenario mit einem Druck von $2 * 10^{-12}$ Torr um den Faktor 3,75 geringer [21]. Dieses Beispiel dient als Untermauerung der Annahme, dass der Faktor C_{CW} den kleinstmöglichen Wert 1,04 annimmt.

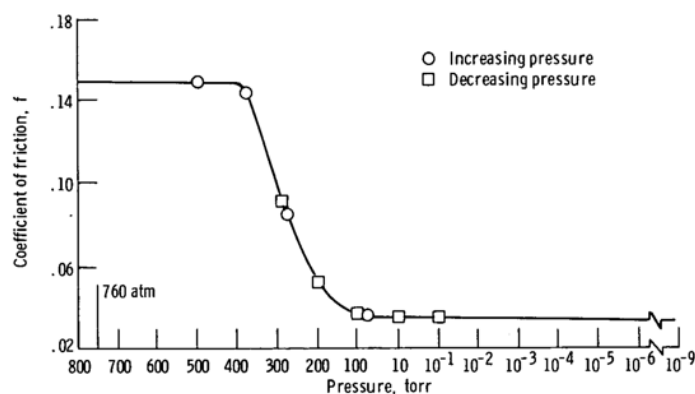


Abbildung 2: Reibungskoeffizient eines Kugellagers in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks [21].

Der Temperaturfaktor beträgt bis zu einer Temperatur T_0 von unter 183 °C $C_t = 1$ und wird erst ab einer Temperatur von 183 °C und höher relevant für die Ausfallrate λ_{BE} des Rillenkugellagers.

Für $T_0 \geq 183$ °C gilt:

$$C_t = \left(\frac{T_0}{183} \right)^3 \quad (8)$$

Für das Erdszenario mit einer durchschnittlichen Temperatur zwischen 1,2 °C im Januar und 18,7 °C im Juli beträgt der Faktor $C_t = 1$ [11].

Im Mondszenario während des Tages mit einer Bauteiltemperatur von 195 °C beträgt jener Faktor 1,21. Da in der Nacht im Mondszenario Temperaturen bis partiell unter -200 °C auftreten können und die Abbildung

7.3 (siehe [14]) keinen negativen Temperaturverlauf abbildet, muss der Faktor anhand der Abbildung 3 geschätzt werden [4,14]. Die Abbildung zeigt die Leistung eines Elektromotors, die erbracht werden muss, um eine mit einem Kugellager gelagerte Welle auf einer konstanten Drehzahl zu halten. Ausgehend von -130 °C in der Nacht im Mondscenario und einem Temperaturanstieg um 75 °C erreicht das Kugellager eine Temperatur von -55 °C . Die benötigte Leistung unter Verwendung von Molybdändisulfid bei -65 °C im Vergleich zur Ausgangstemperatur hat sich von $0,6\text{ W}$ auf 1 W um den Faktor $1,67$ vergrößert [19]. Dieser Faktor wird als Temperaturfaktor C_t für das Mondscenario verwendet.

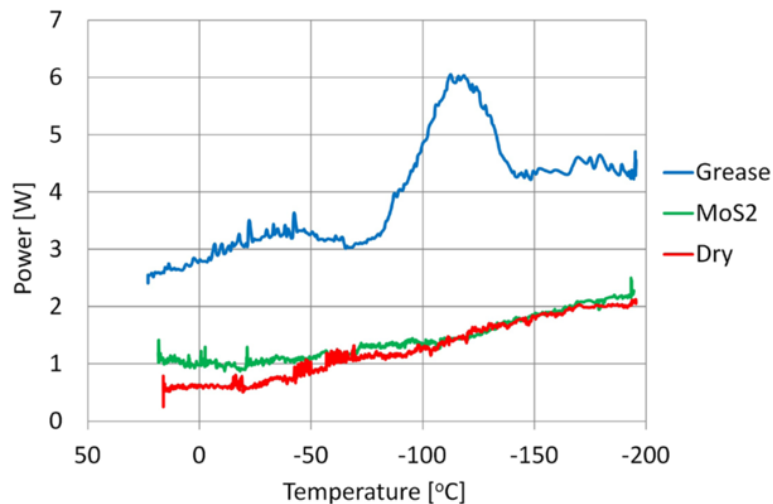


Abbildung 3: Temperaturabhängige zu erbringende Leistung zum Erhalt einer konstanten Drehzahl des Lagers [19].

Der Service-Faktor C_{SF} wird in Abhängigkeit des möglichen Einsatzszenarios festgelegt und kann einen Wert zwischen 1 und 3 annehmen. Dabei werden drei Szenarien mit unterschiedlich starker Ausprägung der Faktoren Vibration und Schlägen vorgegeben. In diesem Szenario wird der laut Tabelle 7-2 (siehe [14]) höchste Einflussfaktor (1,5-3,0) gewählt, da während der Bohrung mit erheblichen Vibrationen und Schlägen zu rechnen ist [14]. Als Faktor wird $C_{SF} = 2,250$ angenommen.

Nachdem sämtliche Einflussfaktoren ermittelt werden konnten, können diese in Gleichung (1) zur Berechnung der Ausfallrate λ_{BE} eingesetzt werden. Die Ausfallrate λ_{BE} des Rillenkugellagers bei Verwendung des herkömmlichen Schmierstoffes im Erdszenario beträgt $3,70 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions].

Bei der Verwendung des Festschmierstoffes Molybdändisulfid im Mondscenario beträgt λ_{BE} am Tag $6,08 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions] und $8,39 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions] in der Nacht. Es ist davon auszugehen, dass die Welle des Elektromotors durch zwei identische Kugellager gelagert ist. Deshalb wird λ_{BE} für die weiteren Berechnungen auf $7,39 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions] im Erdszenario und im Mondscenario auf $12,15 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions] am Tag und $16,78 \cdot 10^{-3}$ [failures/million revolutions] im Mondscenario in der Nacht verdoppelt (Anhang 1,2,3).

4.3 Ausfallrate Welle

Die Ausfallrate der Welle setzt sich aus der Grundaussfallrate der Welle und vier weiteren Faktoren zusammen.

$$\lambda_{SH} = \lambda_{SH,B} * C_f * C_T * C_{DY} * C_{SC} \quad (9)$$

Die Grundaussfallrate $\lambda_{SH,B}$ [failures/million cycles] ist abhängig von der Anzahl der Umdrehungen bis zum Ausfall unter Normalbelastung und der Materialermüdungsgrenze. Da die Berechnung über die Grenzen dieser Arbeit hinausgehen würden, wird die Grundaussfallrate $\lambda_{SH,B}$ bei hohen Belastungen auf 2,2 [failures/million hours] geschätzt [22]. Um die Ausfallrate λ_{SH} [failures/million cycles] zu bestimmen, muss der Wert der Schätzung in die vorgegebene Einheit umgerechnet werden. L_{hours} repräsentiert die Anzahl der Stunden bis zum Ausfall und beträgt 454545,46 Stunden.

$$L_{hours} = \frac{1 * 10^6}{\lambda_{SH,B}} \quad (10)$$

L_{cycle} gibt die Anzahl der Umdrehungen bis zum Ausfall an und beträgt bei $n = 85$ Umdrehungen pro Minute $2,32 * 10^9$ Umdrehungen.

$$L_{cycle} = L_{hours} * n * 60 \quad (11)$$

und

$$\lambda_{SH,B} = \frac{1 * 10^6}{L_{cycle}} \quad (12)$$

Somit ergibt sich eine Grundaussfallrate $\lambda_{SH,B}$ von $431,37 * 10^{-6}$ [failures/ million cycles] (Anhang 4).

Die Oberflächenbeschaffenheit (*Surface finish*) der Welle hat ebenfalls einen Einfluss auf die Ausfallrate λ_{SH} und wird durch den Faktor C_f beschrieben. Bei diesem Beispiel wird warm gewalzter Edelstahl verwendet, welcher eine Zugfestigkeit (*Endurance Limit*) T_S [kpsi] von 155 laut Tabelle 20-4 (siehe [14]) aufweist [14]. Wird zusätzlich die Temperatur von -55 °C im MondszENARIO in der Nacht berücksichtigt, steigt die Zugfestigkeit des Materials im Vergleich zur Ausgangstemperatur um den Faktor 1,19 [23].

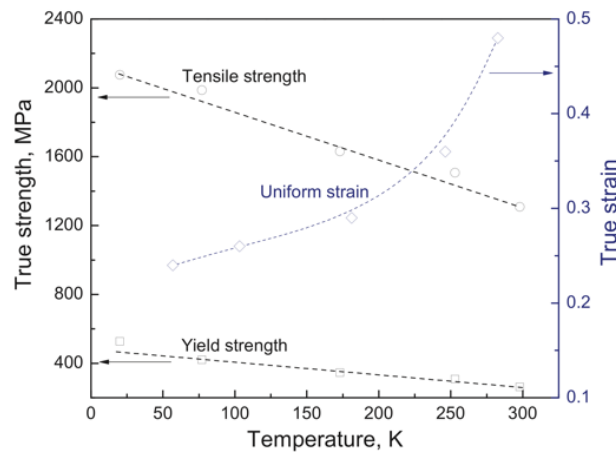


Abbildung 4: Zugfestigkeit T_S (Tensile strenght) in Abhängigkeit der Temperatur [23].

Wird diese Erkenntnis auf dieses Szenario übertragen, erhöht sich die Zugfestigkeit T_S auf 184,5. C_f berechnet sich in diesem Fall über:

$$C_f = 0,94 - 0,0046 * T_S + 8,37 * 10^{-6} * (T_S)^2 \quad (13)$$

Der Oberflächenbeschaffenheitsfaktor C_f beträgt 0,428 bei $T_S = 155$ und 0,376 bei $T_S = 184,5$.

Der Temperaturfaktor C_T [°F] hat bis zu einer Temperatur T_{AT} von 160 °F (71,1 °C) den Wert 1.

$$C_T = \frac{460 + T_{AT}}{620} \quad (14)$$

Im Erdszenario mit einer Materialtemperatur von 203 °F (95 °C) beträgt jener Faktor 1,07. Im Mondszenario am Tag mit einer Ausgangstemperatur von 120 °C und einem Anstieg um 75 °C auf 195 °C (383 °F) beträgt der Faktor 1,36, in der Nacht aufgrund der niedrigen Temperaturen 1.

Der Wellenversatzfaktor C_{DY} ist abhängig vom Gewicht der Welle F [lb], ihrer Länge l [in], dem Elastizitätsmodul des Werkstoffs (*Modulus of Elasticity*) E [lbs/in²] und dem Trägheitsmoment I [in⁴]. Die Gesamtlänge der Welle soll 23,622in (600mm) betragen, davon hat Abschnitt l_1 eine Länge von 18,110in (460mm) mit einem Durchmesser d_1 von 2,559in (65mm) und Abschnitt l_2 eine Länge von 5,512in (140mm) mit einem Durchmesser d_2 von 2,362in (60mm). Die Masse für den Abschnitt l_1 bei Verwendung von Edelstahl mit einer durchschnittlichen Dichte von 8kg/dm³ beträgt 26,921lb (12,211kg) und l_2 weist eine Masse von 6,982lb (3,167kg) auf [24]. Der Freistich hat einen Radius von $r = 0,63$ in (1,6cm) [17]. Das Elastizitätsmodul E beträgt laut Tabelle 20-4 bei Edelstahl 29 [14].

$$C_{DY} = \frac{F}{3E} * \left[\frac{l_1^3}{I_1} + \frac{l_2^3}{I_2} \right] \quad (15)$$

wobei

$$I_{1,2} = \frac{\pi * d_{1,2}^4}{64} \quad (16)$$

Somit beträgt der Faktor C_{DY} $1,14 * 10^{-3}$.

Der Kerbwirkungsfaktor C_{SC} ist abhängig von der Relation des Kerbradius zum Wellendurchmesser $C_{SC,G}$ und zum Radius der Verrundung $C_{SC,R}$. Da keine Einkerbung in der Welle angenommen wird, beträgt Faktor laut Abschnitt 20.4.5 (siehe [14]) $C_{SC,G} = 1$ [14].

$$C_{SC} = C_{SC,R} + C_{SC,G} \quad (17)$$

In Gleichung (18) entspricht r dem Radius des Freistiches, d dem Durchmesser d_1 und D dem Durchmesser d_2 . Der Faktor $C_{SC,R}$ berechnet sich über:

$$C_{SC,R} = \left(\frac{0,3}{r/d}\right)^{0,2} * \left(\frac{D}{d}\right)^{(1-r/d)} \quad (18)$$

$C_{SC,R}$ beträgt 1,028, der gesamte Kerbwirkungsfaktor C_{SC} beträgt 2,028.

Anschließend können die Grundaussfallrate $\lambda_{SH,B}$ und die ermittelten Faktoren in Gleichung (9) eingesetzt werden, die Ausfallrate der Welle λ_{SH} im Erdszenario beträgt somit $457,50 * 10^{-9}$ [failures/million cycles] (Anhang 5). Die Ausfallrate der Welle λ_{SH} im Mondszenario beträgt tagsüber $581,70 * 10^{-9}$ [failures/million cycles] und $375,98 * 10^{-9}$ [failures/million cycles] in der Nacht (Anhang 6,7).

4.4 Ausfallrate Elektromotor

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Ausfallraten der Bauteile ist die Ausfallrate λ_M [failures/million hours] des Elektromotors zusätzlich von anderen Bauteilen abhängig. Sie setzt sich ausschließlich aus Ausfallraten zusammen, dazu zählen ebenfalls die vorab ermittelten Ausfallraten des Rillenkugellager λ_{BE} [failures/million hours], der Welle λ_{AS} [failures/million hours] und des Zahnrads λ_{GR} [failures/million hours]. Es ist anzumerken, dass λ_{AS} in diesem Fall mit der Ausfallrate der Welle λ_{SH} gleichzusetzen ist. Die Ausfallrate einer Bürste λ_{BS} [failures/million hours/brush] wird laut Gleichung 14-1 auf 3,2 geschätzt, in diesem Fall soll der Elektromotor zwei Bürsten mit λ_{BS} von 6,4 besitzen [14]. Die Ausfallrate des Statorgehäuses λ_{ST} [failures/million hours] wird auf Basis der Gleichung 14-1 (siehe [14]) auf 0,001 geschätzt [14].

$$\lambda_M = \lambda_{BE} + \lambda_{WI} + \lambda_{BS} + \lambda_{AS} + \lambda_{ST} + \lambda_{GR} \quad (19)$$

Die Ausfallrate der Wicklungen des elektrischen Motors λ_{WI} [failures/million hours] ist abhängig von der Grundaussfallrate $\lambda_{WI,B}$ [failures/million hours], dem Umgebungstemperaturfaktor C_T , dem Spannungsfaktor C_V und dem Höhenfaktor C_{alt} .

$$\lambda_{WI} = \lambda_{WI,B} * C_T * C_V * C_{alt} \quad (20)$$

Die Grundaussfallrate $\lambda_{WI,B}$ [failures/million hours] wird auf 50 geschätzt. Die Schätzung beruht auf der Annahme, dass die Lebensdauer L_I laut Abschnitt 14.5.1 (siehe [14]) 20.000 Stunden beträgt [14]. Die Berechnung erfolgt über die Gleichung:

$$\lambda_{WI,B} = \frac{1,0 * 10^6}{L_1} \quad (21)$$

Der Temperaturfaktor C_T wird bestimmt durch die Temperaturklassifizierung der Wicklungen T_r [°C] und die tatsächliche Temperatur des Motors während der Nutzung T_0 [°C]. Im Falle des Erdszenarios wird eine Temperaturklassifizierung laut Tabelle 14-2 von A (105 °C) angenommen, im Mondszenario die Klassifizierung H (180 °C) [14]. T_0 soll, beruhend auf Schätzungen, für das Erdszenario 95 °C betragen, für das Mondszenario entsprechend 195 °C am Tag und –55 °C in der Nacht. Faktor k beträgt laut Gleichung 14-5 (siehe [14]) gleich 1 [14].

$$C_T = k * 10^{2357 * \left[\frac{1}{T_r + 273} - \frac{1}{T_0 + 273} \right]} \quad (22)$$

Somit beträgt der Faktor C_T für das Erdszenario 0,68 und 1,47 für das Mondszenario tagsüber. Für das Mondszenario mit Temperaturen unter –55 °C würde C_T einen Wert kleiner als $2,46 * 10^{-6}$ annehmen und ist somit nicht brauchbar. Aufgrund der nicht vorhandenen Möglichkeit zur exakten Bestimmung des Temperaturfaktors, wird C_T im Mondszenario auf den Faktor 3 geschätzt.

Für den Faktor C_V wird der Wert 1 angenommen. Die Schätzung beruht darauf, dass die anliegende Spannung geringer ist als die Spannungseinstufung des Motors und der Faktor somit im Kontext laut Gleichung 14-7 keinen Effekt auf die Ausfallrate hat [14].

Faktor C_{alt} ist ausschließlich für offene Motoren relevant. Bei vor Umwelteinflüssen geschützten Motoren, wie in diesem Fall, beträgt der Faktor laut Abschnitt 14.5.4 (siehe [14]) $C_{alt} = 1$ [14]. Werden anschließend sämtliche bisherigen ermittelten Werte in Gleichung (20) eingesetzt, ergibt sich eine Ausfallrate der Wicklungen λ_{WI} im Erdszenario von 11,55 [failures/million hours]. λ_{WI} im Mondszenario beträgt 150 [failures/million hours].

Bevor die einzelnen Ausfallraten in Gleichung (19) eingesetzt werden können, müssen λ_{BE} , λ_{AS} und λ_{GR} in die Einheit failures/million hours umgerechnet werden. Die Ausfallrate des Zahnrads λ_{GR} wird auf der Grundlage des NSWC-10 auf 0,01 [failures/million revolutions] geschätzt. Des Weiteren wird λ_{BE} auf 37,70 [failures/million hours] für das Erdszenario und 61,7 [failures/million hours] tagsüber und 85,53 [failures/million hours] während der Nacht für das Mondszenario verdoppelt, da die Welle des Elektromotors durch zwei Kugellager gelagert wird (Anhang 8,9,10). Die Ausfallrate λ_M für das Erdszenario beträgt

128,95 [failures/million hours] (Anhang 11). Die Ausfallrate λ_M für das MondszENARIO tagsüber beträgt 192,78 [failures/million hours] und 292,93 [failures/million hours] in der Nacht (Anhang 12,13).

4.5 Ausfallrate Dichtung

Die Ausfallrate λ_{SE} [failures/million hours] für Dichtungen ist abhängig von der Grundaufallrate $\lambda_{SE,B}$ [failures/million hours] und sechs weiteren Faktoren. Für $\lambda_{SE,B}$ wird allgemein der Wert 22,8 laut Seite 3-23 angenommen [14].

$$\lambda_{SE} = \lambda_{SE,B} * C_Q * C_F * C_V * C_T * C_N * C_{PV} \quad (23)$$

Der Faktor C_Q ist abhängig von dem maximal zulässigen Austritt des Schmiermittels Q_f [in³/min]. Wenn der zulässige Austritt Q_f größer als 0,055in³/min (0,9cm³/min) ist, berechnet sich C_Q durch:

$$C_Q = \frac{0,055}{Q_f} \quad (24)$$

Für diesen Fall wird Q_f konservativ auf 0,027 geschätzt, da davon auszugehen ist, dass der gewählte Dichterring möglichst wenig Schmiermittel austreten lassen wird. Somit beträgt $C_Q = 2,067$.

Der Oberflächenbeschaffenheitsfaktor C_f ist abhängig von dem Durchmesser der Welle, dem Toleranzgrad und der Funktion der Fläche. Für die Welle mit einem Durchmesser $d = 60$ mm, einem Toleranzgrad von r7 und der Funktion einer Dichtfläche wird eine gemittelte Rautiefe Rz [μm] von 4 empfohlen [17]. Der entsprechende Mittelrauwert Ra [μm] befindet sich ungefähr zwischen 0,2 bis 1,0 [17]. Der in diesem Bereich naheliegendste Wert zur Ermittlung der RMS beträgt Ra 0,63, folglich beträgt RMS 28 [25]. Für f [μin RMS] > 10μin (0,254μm) gilt:

$$C_f = \frac{1}{2^{((10-f)/38)}} \quad (25)$$

Faktor C_f beträgt 1,39.

Der Viskositätsfaktor C_V ist abhängig von der Temperatur und der dynamischen Viskosität des Schmiermittels ν [lbf-min/in²]. Da keine Informationen zur dynamischen Viskosität eines Schmierstoffes vorliegen und die Spanne der möglichen Werte laut Tabelle 3-3 keinen Aufschluss über einen möglichen Wert gibt, wird C_V auf den Faktor 3 geschätzt. Es gilt:

$$C_V = \frac{2 * 10^{-8}}{\nu} \quad (26)$$

Der Temperaturfaktor C_T ist abhängig von der Differenz t der empfohlenen Gebrauchstemperatur T_R [°F] laut Tabelle 3-5 und der tatsächlichen Temperatur während des Gebrauchs T_0 [°F] [14]. Sollte die Differenz größer als 40 °F sein, beträgt C_T 0,21. Ansonsten gilt:

$$C_T = \frac{1}{2t} \quad (27)$$

und

$$t = \frac{(T_R - T_0)}{18} \quad (28)$$

Für das Erdszenario mit einer maximalen Temperatur von 95 °C (203 °F) und einer empfohlenen maximalen Temperatur von 121,1 °C (250 °F) für Nitrildichtungen beträgt die Differenz 47 °F [14]. Somit beträgt C_T 0,21. Für das MondszENARIO tagsüber kommen einige wenige Materialien in Frage, die einer Temperatur von 195 °C (383 °F) standhalten würden. Sollte ebenfalls ein Dichtring aus Nitril verwendet werden, würde der Faktor 167,60 betragen und somit die Ausfallrate erheblich beeinträchtigen. In diesem Fall ist die Verwendung eines Silikon-Dichtrings zu empfehlen. Dieser weist eine Temperaturbeständigkeit von –60 °C (–76 °F) bis (450 °F) auf [14,26]. Somit beträgt der Temperaturfaktor tagsüber 0,21. Da der NSWC-10 keine Angaben über C_T bei Temperaturunterschreitungen im negativen Bereich gibt, muss der Wert geschätzt werden. Aufgrund fehlender Informationen wird der Faktor bei Temperaturunterschreitung wie bei der Temperaturüberschreitung berechnet. Die Differenz zwischen der empfohlenen Temperatur –76 °F und der tatsächlichen Temperatur –67 °F beträgt 9 °F. Bei dieser Temperaturdifferenz würde C_T den Wert 0,71 annehmen.

Der Verunreinigungsfaktor C_N ist abhängig von der Pumpenart, der Filtergröße C_0 [microns], der Durchflussmenge GPM_R [gallons/min] und der Anzahl der Partikel kleiner als 10µm N_{10} .

$$C_N = \left(\frac{C_0}{C_{10}}\right)^3 * N_{10} * GPM_R \quad (29)$$

Da diese Berechnung und die damit einhergehende Recherche über die Grenzen dieser Arbeit hinaus gehen würden, wird der Faktor C_N laut Tabelle 3-8 aufgrund der rauen Umwelteinflüsse auf 4,0 geschätzt [14].

Der Druckgeschwindigkeitsfaktor C_{PV} kann ebenfalls aufgrund fehlender Informationen nicht ermittelt werden und wird konservativ auf 3 geschätzt.

Anschließend können alle ermittelten Werte in Gleichung (23) eingesetzt werden, die Ausfallrate für das Erdszenario λ_{SE} beträgt 494,76 [failures/million hours] (Anhang 14). Im MondszENARIO beträgt λ_{SE} tagsüber ebenfalls 494,76 [failures/million hours] und 1665,92 [failures/million hours] in der Nacht (Anhang 15,16).

4.6 Ausfallrate Bohrer

Da die Ausfallrate des Bohrers λ_B [failures/million hours] weder mit der FIDES noch mit dem NSWC-10 berechnet werden kann, muss diese mit Hilfe einer anderen Herangehensweise ermittelt werden. Dafür wird vorab die Gesteinszusammensetzung des Mondgesteins analysiert. Wie bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt, beträgt der durchschnittliche SiO_2 -Gehalt des Mondgesteins 43,4 %. Abbildung 3 zeigt, dass bei diesem SiO_2 -Gehalt eine Lebensdauer von 1100 [m/bit] zu erwarten ist [5].

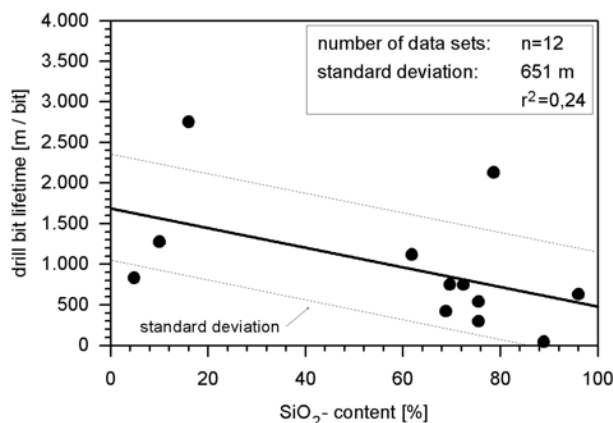


Abbildung 5: Lebensdauer eines Bohrers [m/bit] in Abhängigkeit des Siliziumdioxidgehalts [5].

Anschließend muss ermittelt werden, nach welcher zeitlichen Dauer t_B [min] die Lebensdauer L_B von 1100 [m/bit] erreicht wird. Es wird angenommen, dass jede Bohrung 1m tief sein soll [27]. Zum Erreichen dieser Bohrtiefe wird laut Abbildung 4 eine Zeit von 90 Minuten benötigt.

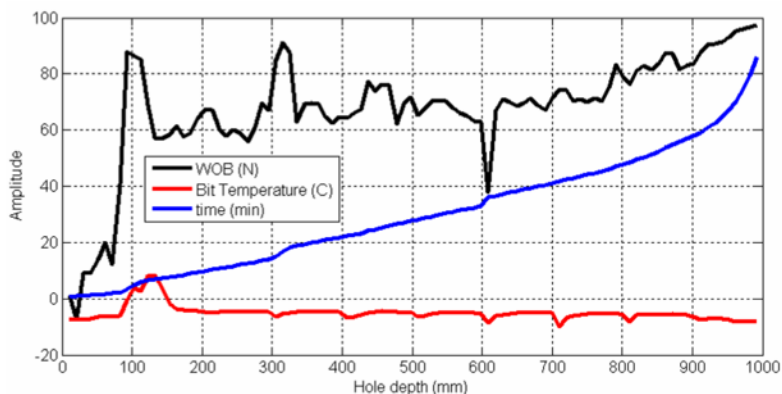


Abbildung 6: Bohrdauer der Bohrung (blauer Graph) [27].

T_B [min] soll die Betriebszeit bis zum Ausfall (*Operating time to failure*) darstellen. Die Berechnung erfolgt über:

$$T_B = t_B * L_B \quad (30)$$

Somit beträgt die Zeit bis zum Ausfall $T_B = 99.000$ Minuten, umgerechnet 1650 Stunden. Die Ausfallrate λ_B kann auf Grundlage von Gleichung (21) berechnet werden und beträgt 606,07 [failures/million hours].

4.7 Gesamtausfallrate

Zur Bestimmung der Gesamtausfallrate (*Total failure rate*) des Moduls λ [failures/million hours] werden die vorab berechneten Ausfallraten der einzelnen Bauteile aufsummiert. Die Ausfallraten der Kugellager und der Welle sind bereits in λ_M enthalten.

$$\lambda = \lambda_M + \lambda_{SE} + \lambda_B \quad (31)$$

Die Gesamtausfallrate des Moduls im Erdszenario beträgt 1229,77 [failures/million hours] (Anhang 17). Die Gesamtausfallrate des Moduls im Mondszenario beträgt tagsüber 1293,60 [failures/million hours] und 2564,93 [failures/million hours] in der Nacht (Anhang 18,19).

Tabelle 1: Vergleich der Ausfallraten einzelner Bauteile im Mond- und Erdszenario.

Ausfallrate	Mondszenario Tag [failures/million hours]	Mondszenario Nacht [failures/million hours]	Erdszenario [failures/million hours]
λ_M	192,78	292,93	128,95
λ_{BE}	61,97	85,53	37,70
λ_{WI}	73,41	150	33,85
λ_{BS}	6,40	6,40	6,40
$\lambda_{AS/SH}$	$2,97 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
λ_{ST}	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
λ_{GR}	51	51	51
λ_{SE}	494,76	1665,92	494,76
λ_B	606,07	606,07	606,07
λ	1293,60	2564,93	1229,77

Die Lebensdauer T [h] des gesamten Moduls ergibt sich allgemein aus [28]:

$$T = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (32)$$

Dabei repräsentiert λ_i die Ausfallrate einer Komponente. Werden nun die Werte aus Tabelle 1 in Gleichung (32) eingesetzt, ergibt sich eine Lebensdauer T von 813,16 Stunden für das Erdszenario, 773,04 Stunden für das Mondszenario tagsüber und 389,87 Stunden in der Nacht. Allgemein wird davon ausgegangen, dass

die Strahlung im Weltraum auf Metalle keinen signifikanten Einfluss hat. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Mission weniger als mehrere hundert Jahre dauert [29].

Es muss jedoch beachtet werden, dass die Ausfallraten des Mondszenarios nicht als endgültig angesehen werden können. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der NSWC-10 keine Möglichkeit zur Modellierung von Temperaturschwankungen während des Betriebs zulässt.

5 Zuverlässigkeitsanalyse FIDES

5.1 Allgemeines Zuverlässigkeitsmodell

Die Ausfallrate λ in der FIDES unterteilt sich grundlegend in die Ausfallrate in Abhängigkeit der physischen Einflussfaktoren $\lambda_{physical}$ und zwei Einflussfaktoren. Die Ausfallrate $\lambda_{physical}$ ist unter anderem abhängig von Temperaturveränderungen, der relativen Luftfeuchtigkeit, sowie der Dauer der einzelnen Phasen. Π_{PM} (Part Manufacturing) und $\Pi_{Process}$ repräsentieren die Einflussfaktoren, welche während der Entwicklung, Herstellung und Überwachung des Produktes auftreten können.

$$\lambda = \lambda_{physical} * \Pi_{PM} * \Pi_{Process} \quad (33)$$

$\lambda_{physical}$ lässt sich weiter aufteilen und ist unter anderem abhängig von der Phasendauer. Dabei wird die Ausfallrate [FIT] der physischen Einflussfaktoren anhand der Phasendauern gewichtet. Die einzelnen Phasendauer sind der prozentuale Anteil der Gesamtdauer, in diesem Fall wird ein Jahr (8760 Stunden) als Gesamtdauer angesehen.

$$\lambda_{physical} = \left(\frac{Annual_time_{phase-i}}{8760} * \lambda_{phase-i} \right) \quad (34)$$

Allgemein ist die Ausfallrate für elektronische Bauteile abhängig von der Summe der einzelnen Ausfallraten von $\lambda_{Components}$, λ_{PCB} , $\lambda_{COTS\ boards}$ und $\lambda_{Other_subassemblies}$. In diesem Szenario kann lediglich die Ausfallrate von $\lambda_{Other_subassemblies}$ bestimmt werden.

$$\lambda_{product} = \left(\begin{array}{c} \sum_{Components} \lambda_{Components} + \sum_{PCB} \lambda_{PCB} \\ + \sum_{Boards} \lambda_{COTS\ boards} + \sum_{other_S-A} \lambda_{Other_subassemblies} \end{array} \right) \quad (35)$$

Die Ausfallrate $\lambda_{physical}$ ist zusätzlich abhängig von physischen Einflussfaktoren unter normalen umweltbedingten Belastungen und bei Überbeanspruchung. Zu den normalen Belastungen $\Pi_{acceleration}$ zählen thermische, elektrische, mechanische, chemische und luftfeuchtigkeitsabhängige Faktoren sowie Temperaturschwankungen. λ_0 beschreibt die Grundaufallrate des entsprechenden Bauteils und ist im FIDES vorgegeben.

$$\lambda_{physical} = \left[\sum_{Physical_Contributions} (\lambda_0 * \Pi_{acceleration}) \right] * \Pi_{induced} \quad (36)$$

Der Faktor $\prod_{induced}$ repräsentiert die Überbeanspruchung der Bauteile und wird im weiteren Verlauf näher erläutert.

Der prozessrelevante Faktor \prod_{PM} ist abhängig von der Bauteilqualität, der Qualitätssicherung des Herstellers $QM_{manufacturer}$, des Produktes QA_{item} und der Erfahrung mit dem Zulieferer ε [30].

$$\prod_{PM} = e^{\delta_1 * (1 - Part_Grade) - \alpha_1} \quad (37)$$

wobei

$$Part_Grade = \left[\frac{(QM_{manufacturer} + QA_{item} + RA_{component}) * \varepsilon}{36} \right] \quad (38)$$

Aufgrund der fehlenden Informationen zum Hersteller und dessen Lieferanten muss der Wert geschätzt werden. Der zu erwartende Faktor kann einen Wert zwischen 0,5 und 2,0 annehmen. Sollten keine Daten und Werte vorhanden sein, soll laut der FIDES ein Faktor von 1,6 angenommen werden [30].

Der Prozessfaktor $\prod_{Process}$ ist abhängig von der Prozesskontrolle und der Kontrolle über die Zuverlässigkeit des Produktlebenszyklus [30].

$$\prod_{Process} = e^{\delta_2 * (1 - Process_Grade)} \quad (39)$$

Da keine Informationen zu den Prozessen und Kontrollen der Hersteller vorliegen, muss der Faktor $\prod_{Process}$ auf 4,0 geschätzt werden. Die Schätzung beruht auf der Annahme der FIDES bei fehlenden Informationen [30].

5.2 Phasenmodellierung Erde

Der nachfolgende Abschnitt erläutert den Tagesablauf des Roboters im Erdszenario. Das Ziel ist es, eine möglichst präzise Übersicht über die einzelnen Abläufe des Tages im Zusammenhang mit den verschiedenen Einflussfaktoren zu generieren. Anschließend können diese Werte zur weiteren Berechnung der Zuverlässigkeit herangezogen werden. Um die Zuverlässigkeit des Bohrmoduls zu ermitteln, werden zuerst die einzelnen Arbeitsphasen in zeitliche Abschnitte unterteilt. Hierzu wird vorab die Dauer der einzelnen Arbeitsphasen pro Jahr (8760 Stunden) bestimmt.

Um die Aussagekraft der Berechnungen zu erhöhen, werden die Betriebstage auf die vier Jahreszeiten aufgeteilt. Mit Hilfe dieser Aufteilung können Einflussfaktoren, wie Temperaturschwankungen und die relative Luftfeuchtigkeit, exakter bestimmt werden.

- Anzahl der Betriebstage im Frühling: 91 Tage pro Jahr
- Anzahl der Betriebstage im Sommer: 91 Tage pro Jahr
- Anzahl der Betriebstage im Herbst: 91 Tage pro Jahr

- Anzahl der Betriebstage im Winter: 92 Tage pro Jahr

Für den Standort Oberpfaffenhofen wurde eine durchschnittliche Umgebungstemperatur von 8,97 °C für den Frühling (März-Mai), 18,3 °C für den Sommer (Juni-August), 9,23 °C für den Herbst (September-November) und 1,8 °C für den Winter (Dezember-Februar) bestimmt [11]. Dafür wurde die durchschnittliche Monatstemperatur von je drei Monaten aufsummiert und anschließend der arithmetische Mittelwert berechnet. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit wurde ebenfalls nach dieser Vorgehensweise ermittelt und beträgt im Frühling 65,67 %, im Sommer 67,0 %, im Herbst 80,33 % und im Winter 81,33 % [31].

Jeder Betriebstag läuft nach demselben Muster ab. Der Betriebstag beginnt mit der Anfahrt zum festgelegten Zielort. Am Zielort angekommen wird das Bohrmodul aktiviert und der Roboter führt die Bohrung durch. Nach der Beendigung der Bohrung wird das Bohrmodul deaktiviert und der Roboter fährt den nächsten Zielpunkt an.

Tabelle 2: Einzelne Arbeitsphasen pro Betriebstag.

Event		Schritt	
1	Anfahrt zum Zielort	1	Fahren
2	Aktivierung des Bohrmoduls	2	Anlauf des Bohrers
3	Durchführung der Bohrung	3	Bohren
4	Stoppen des Bohrmoduls	4	Bohrung beenden
5	Anfahrt des nächsten Zielortes	5	Fahren

Nach der Festlegung der einzelnen Events und Schritte wird die Dauer der Schritte ermittelt. Es wird angenommen, dass eine Fahrt zwischen den Zielorten je 90 Minuten dauert. Der gesamte Bohrvorgang dauert ebenfalls 90 Minuten und soll die Schritte zwei bis fünf umfassen. Ein Betriebstag umfasst acht Zyklen. Der Zyklus beginnt je mit der Anfahrt zum Zielort (Schritt 1) und endet nach der Beendigung der Bohrung.

Tabelle 3: Dauer der Schritte

Schritt		Duration
1	Fahren	90 Minuten
2	Anlauf des Bohrers	2 Minuten
3	Bohren	86 Minuten
4	Bohrung beenden	2 Minuten
5	Fahren	90 Minuten

Anschließend werden die externen Einflussfaktoren für die einzelnen Schritte ermittelt. Zusätzlich werden die Gründe für die Änderungen der Einflussfaktoren erläutert.

Tabelle 4: Identifikation der Äußeren Einflussfaktoren.

Schritt		Stress variation relative to parking phase	Cause of variation
1	Fahren	Temperatur	Temperaturschwankung (Area)
2	Anlauf des Bohrers	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Vibration	Vibrations-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankung durch Anlauf des Bohrmoduls
3	Bohren	Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Vibration	Vibrations-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankung aufgrund der Bohrung
4	Bohrung beenden	Temperatur, Luftfeuchtigkeit	Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankung aufgrund des Abkühlprozesses
5	Fahren	Temperatur	Temperaturschwankung (Area)

Zur Bestimmung von t_{annual_phase} werden die täglichen Dauern der einzelnen Phasen mit der Anzahl der Betriebstage im Jahr multipliziert.

Tabelle 5: Bestimmung der täglichen und jährlichen Gesamtdauern einzelner Phasen.

Phase	Tägliche Dauer	Tage pro Jahr	t_{annual_phase}
Fahren	720 Minuten	365	4380 h
Anlauf des Bohrers	16 Minuten	365	97,3 h
Bohren	688 Minuten	365	4185,3 h
Bohrung beenden	16 Minuten	365	97,3 h

Die Kalenderzeit [hours] der Jahreszeiten unterteilt sich je in die Phasen „Driving“, „Pre-Drilling“, „Drilling“ und „Stop-Drilling“. Dazu wird die Zeit der Phasen anteilig für jede Jahreszeit berechnet. Somit beträgt die Driving-Phase 1092 Stunden, die Bearing-Phase 1043,47 Stunden. Die übrigen beiden Phasen dauern je 24,27 Stunden. Da der Winter einen Tag mehr umfasst, weisen diese Kalenderzeiten größere Werte auf.

Zur Bestimmung der Temperaturgraphen werden drei unterschiedliche Datensätze benötigt. Dazu gehören die klimatischen Bedingungen der Betriebsumgebung, welche die Temperatur und Luftfeuchtigkeit widerspiegeln.

Zur Bestimmung von $T_{ambient}$ [°C] für unterschiedliche Phasen in den vier Jahreszeiten werden die mittleren Temperaturen der einzelnen Monate verwendet. Während der Driving-Phase hat ausschließlich die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Bauteile. Die mittlere Tiefst- und Höchsttemperatur für die Jahreszeiten ergibt sich aus dem Mittelwert der mittleren Tiefst- und Höchsttemperaturen der einzelnen

Monate. Die mittlere Höchsttemperatur im Sommer beträgt $23,97\text{ °C}$, die mittlere Tiefsttemperatur $12,4\text{ °C}$. Es wird angenommen, dass die Temperaturen innerhalb eines Tages zwischen $23,97\text{ °C}$ tagsüber und $12,4\text{ °C}$ nachts schwanken. Aufgrund der ständigen Schwankungen wird für T_{ambient} der Mittelwert $18,19\text{ °C}$ verwendet. Die Werte für T_{ambient} der anderen Jahreszeiten, während der Driving-Phase werden nach demselben Prinzip ermittelt und betragen $9,38\text{ °C}$ im Herbst, $1,83\text{ °C}$ im Winter und $8,90\text{ °C}$ im Frühling.

T_{ambient} steigt während des Betriebs des Bohrmoduls um 75 °C an. Daraus ergeben sich Werte von $83,90\text{ °C}$ im Frühling, $93,19\text{ °C}$ im Sommer, $84,38\text{ °C}$ im Herbst und $76,83\text{ °C}$ im Winter. Während der Fahrt ist T_{ambient} ausschließlich von der vorhandenen Umgebungstemperatur abhängig. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Temperatur während der Rückfahrt um 75 °C fällt und den ursprünglichen Wert einnimmt [30,11].

Zur Bestimmung der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit wird jeweils der Mittelwert über die drei Monate für die vier Jahreszeiten ermittelt. Die durchschnittliche Luftfeuchtigkeit für die Fahr- und Parkphase im Sommer beträgt $67,0\%$, im Herbst $80,33\%$, im Winter $81,33\%$ und im Frühling $65,67\%$ [31]. Die relative Luftfeuchtigkeit während der Bohrphase wird für alle Jahreszeiten auf 10% geschätzt. Die Schätzung ist an Tabelle 3.6.3 (siehe [30]) mit ähnlichen Temperaturen angelehnt.

Die Temperaturschwankung ΔT beschreibt die Differenz zwischen der niedrigsten und höchsten Temperatur in einer Phase. Da während der Driving-Phase weder Temperaturschwankungen durch Bauteile noch durch eine sich verändernde Umgebungstemperatur auftreten, beträgt $\Delta T\ 0\text{ °C}$. Für alle anderen Phasen und Jahreszeiten beträgt $\Delta T\ 75\text{ °C}$.

Die Zyklusdauer entspricht den bereits ermittelten Dauern der einzelnen Phasen in Tabelle 4. Bei acht Zyklen pro Tag und je 91 Tagen pro Jahreszeit beträgt die Anzahl der Zyklen pro Jahr 728. Der Winter dauert in diesem Szenario einen Tag länger und umfasst dementsprechend 736 Zyklen pro Jahr.

Die maximal erreichten Temperaturwerte während der einzelnen Phasen entsprechen den Temperaturen von T_{ambient} .

Die Vibrationsamplitude muss basierend auf ähnlichen Szenarien geschätzt werden, da keine Daten zu den auftretenden Vibrationen vorliegen. Während der Fahrt betragen die Vibrationen $0,5\text{ [Grms]}$. Diese Werte sind an ein Fahrzeug während der Fahrt angelehnt [30]. Der Wert während der Bohrphase wird, basierend auf einer Waschmaschine während eines normalen Waschvorganges, auf 9 [Grms] geschätzt [30]. Der Vergleichswert der Waschmaschine wurde gewählt, da es sich in diesem Szenario ebenfalls um rotierende Bauteile mit einer möglichen Unwucht handelt.

Da es sich um eine kontinentale, ländliche Region mit der Möglichkeit zur Wartung handelt, wurden die chemischen Beanspruchungen durch eine Salzverschmutzung, Umwelt- und Anwendungsbelastungen je auf die niedrigste Stufe gesetzt. Diese Faktoren werden lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt, finden jedoch keine weitere Verwendung (Anhang 20).

5.3 Phasenmodellierung Mond

Die Phasenmodellierung des Mondszenarios erfolgt, bis auf einige Abweichungen, ähnlich zur Phasenmodellierung des Erdszenarios. Im Gegensatz zum Erdszenario wird für die Phasenmodellierung des Mondszenarios lediglich zwischen Tag und Nacht unterschieden. Dabei muss beachtet werden, dass ein Tag auf dem Mond 14 Erdtage dauert [4].

Da im nachfolgenden Abschnitt lediglich zwischen Tag und Nacht unterschieden wird, werden die Kalenderzeiten angepasst. Insgesamt beläuft sich die Anzahl der Tage auf 182, die Anzahl der Nächte auf 183. Dementsprechend beträgt die Gesamtzeit für die Phasen tagsüber auf 4356 Stunden und 4404 Stunden in der Nacht. Die Unterscheidung zwischen „On“ und „Off“ ist abhängig vom Betrieb des Bohrmoduls.

T_{ambient} entspricht während der Driving-Phase aufgrund nicht vorhandener Temperaturschwankungen der Umgebungstemperatur von 120 °C tagsüber und –130 °C in der Nacht. Die Temperaturen in den Bohrphasen belaufen sich nach dem geschätzten Temperaturanstieg von 75 °C auf 195 °C tagsüber und –55 °C in der Nacht. Die relative Luftfeuchtigkeit beträgt in allen Phasen permanent 0 %. ΔT ist identisch zum Erdszenario.

Die Anzahl der Zyklen beträgt bei acht Zyklen pro Tag und 182 Tagen tagsüber 1456 und 1464 bei 183 Nächten. Die maximal erreichten Temperaturwerte während der einzelnen Phasen entsprechen den Temperaturen von T_{ambient} . Alle weiteren Einflussfaktoren sind identisch zum Erdszenario (Anhang 22).

5.4 Spezifisches Zuverlässigkeitsmodell

Der folgende Abschnitt zeigt die gesamte Berechnung der Ausfallraten unter Verwendung der FIDES auf. Das Bohrmodul besteht, bis auf den Elektromotor, ausschließlich aus mechanischen Bauteilen. Da die FIDES jedoch für elektronische Bauteile konzipiert wurde, muss zur Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls eine alternative Herangehensweise angewandt werden.

Die herkömmliche Methode besteht aus der Identifikation der elektronischen Bauteile, wie beispielsweise Widerstände und Schalter. Anschließend werden die entsprechenden Berechnungsbögen für jedes Bauteil herausgesucht und für die Rechnungen herangezogen, da für verschiedene Bauteile unterschiedliche Einflussfaktoren vorhanden sind. Die FIDES berücksichtigt keines der im Bohrmodul vorhandenen Bauteile. Deshalb wird zur Berechnung der Ausfallrate des Elektromotors ein ähnliches Bauteil, in diesem Fall ein Ventilator, als Äquivalent verwendet. Der Ventilator ist im Vergleich mit den anderen möglichen Bauteilen jenes, welches die größte Überschneidung hinsichtlich der Bau- und Funktionsweise zum Elektromotor aufweist. Dieser wird ebenfalls von Kugellagern gelagert und weist rotierende Bauteile auf. Die Berechnung der Gesamtausfallrate λ [FIT] des Ventilators erfolgt über:

$$\lambda = \lambda_{Cst} + \lambda_{Wear\ out} \quad (40)$$

λ_{Cst} [FIT] repräsentiert in diesem Fall die konstante Ausfallrate, $\lambda_{Wear\ out}$ [FIT] ist zeitabhängig und dient zur Ermittlung der Ausfallrate unter Anbetracht des Verschleißes.

Die konstante Ausfallrate steht in Abhängigkeit zur Ausfallrate im Hinblick auf physische Einflussfaktoren $\lambda_{Physical}$ [FIT], dem prozessrelevanten Faktor Π_{PM} und dem Prozessfaktor $\Pi_{Process}$.

$$\lambda_{Cst} = \lambda_{Physical} * \Pi_{PM} * \Pi_{Process} \quad (41)$$

Die Ausfallrate mit Berücksichtigung der physischen Einflussfaktoren $\lambda_{Physical}$ setzt sich aus der Grundaussfallrate des Ventilators λ_{0_Fan} [FIT], den externen Einflussfaktoren und dem Faktor $\Pi_{induced-i}$ in Abhängigkeit von der Überbeanspruchung zusammen.

$$\lambda_{Physical} = \lambda_{0_Fan} * \sum_i^{Phases} \left(\frac{t_{annual}}{8760} \right)_i * (\Pi_{Thermo-electrical} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mechanical} + \Pi_{RH})_i * (\Pi_{Induced})_i \quad (42)$$

Die Grundaussfallrate λ_{0_Fan} beträgt laut FIDES 0,17 FIT und bleibt unabhängig der unterschiedlichen Phasen konstant. Der externe Einflussfaktor $\Pi_{Thermo-electrical}$ (nachfolgend auch $\Pi_{Thermal}$) ist abhängig von der Temperatur T [°C] in der Nähe des Kugellagers während einer Betriebsphase. γ_{Th} beträgt laut FIDES 0,51. Bei einer Stillstandsphase beträgt der gesamte Faktor 0.

$$\Pi_{Thermal} = \gamma_{Th} * e^{11604 * 0,15 * \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T+273)} \right]} \quad (43)$$

Aufgrund der fehlenden Temperaturangaben muss T mit Hilfe von $T_{ambient}$ [°C] näherungsweise geschätzt werden. Da nahezu alle Temperaturwerte außerhalb der vorgegebenen Amplitude liegen, ist mit einem verzerrten Ergebnis zu rechnen. Für negative Temperaturen wird der Wert $T = 30$ °C verwendet, da dieser Wert laut FIDES bis Temperaturen von -40 °C angenommen werden soll. Für alle anderen Temperaturen berechnet sich T über:

$$T = 1,1 * T_{ambient} + 12,5 \quad (44)$$

Für Π_{TCy} wird die jährliche Anzahl der Zyklen $N_{annual-cy}$, die jährliche Gesamtdauer der Zyklen t_{annual} [h], die Differenz zwischen der maximalen und minimalen Temperatur $\Delta T_{cycling}$ [°C], sowie die Höchsttemperatur während eines Zyklus $T_{max-cycling}$ [°C] benötigt. γ_{TCy} beträgt laut FIDES 0,31. Der Wert des Zählers in der zweiten Klammer kann einen Wert zwischen null und zwei annehmen. Für eine Zyklusdauer von bis zu zwei Stunden kann der reguläre Wert θ_{cy} eingesetzt werden, bei längeren Zyklen beträgt der Wert im Zähler zwei.

$$\Pi_{Tcy} = \gamma_{Tcy} * \left(\frac{12 * N_{annual-cy}}{t_{annual}} \right) * \left(\frac{\min(\theta_{cy}, 2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}} * \left(\frac{\Delta T_{cyclng}}{20} \right)^{1,9} * e^{1414 * \left[\frac{1}{313} - \frac{1}{(T_{max-cyclng} + 273)} \right]} \quad (45)$$

Der mechanische Einflussfaktor $\Pi_{Mechanical}$ ist abhängig von dem Faktor γ_M mit dem Wert 0,08 laut FIDES und die Vibrationsamplitude G_{RMS} .

$$\Pi_{Mechanical} = \gamma_M * \left(\frac{G_{RMS}}{0,5} \right)^{1,5} \quad (46)$$

Der in diesem Fall letzte externe Einflussfaktor Π_{RH} gibt Aufschluss über die Auswirkungen der relativen Luftfeuchtigkeit $RH_{ambient}$ [%] auf das Modul. γ_{Rh} beträgt laut FIDES 0,11 [30].

$$\Pi_{RH} = \gamma_{Rh} * \left(\frac{RH_{ambient}}{70} \right)^{4,4} * e^{11604 * 0,8 * \left[\frac{1}{293} - \frac{1}{(T_{ambient} + 273)} \right]} \quad (47)$$

Der Faktor $\Pi_{induced-i}$ muss für jede Phase ermittelt werden und nimmt einen Wert zwischen eins und 100 an. Er repräsentiert die Überbeanspruchung und ist wiederum von vier Faktoren abhängig.

$$\Pi_{induced-i} = (\Pi_{placement} * \Pi_{application-i} * \Pi_{ruggedising})^{0,511 * \ln(C_{sensitivity})} \quad (48)$$

Der Faktor $\Pi_{Placement}$ ist abhängig von der Platzierung des Bauteils und beträgt in diesem Fall laut FIDES 1,6 [30].

$\Pi_{Application}$ ist abhängig von acht Kriterien, wie beispielsweise der Mobilität des Moduls und dessen Platzierung. Die Kriterien werden nach drei unterschiedlichen Stufen (P_{marks_k}) bewertet, jedes Kriterium hat eine eigene Gewichtung (Pos_k). Je nach Stufe beträgt der Faktor 1, 3,2 oder 10. Die Berechnung von $\Pi_{Application}$ erfolgt über Gleichung (49) und beträgt während der Driving-Phase 5,45, für alle anderen Phasen beläuft sich der Wert auf 4,91. Diese Werte werden sowohl für das Erdszenario als auch für das Mondszenario angenommen.

$$\Pi_{Application} = \frac{1}{66} * \sum_{k=Criteria} P_{marks_k} * Pos_k \quad (49)$$

Berechnungen und weitere Erläuterungen befinden sich in Anhang (21).

$\Pi_{Ruggedising}$ beschreibt einen Faktor, welcher abhängig vom Umsetzungsgrad der vorgegebenen Empfehlungen ist. Insgesamt werden 16 Empfehlungen mit unterschiedlichen Gewichtungen vorgegeben, der Umsetzungsgrad der jeweiligen Empfehlung unterteilt sich in die Stufen N1 (Mark 0) bis N4 (Mark 3).

$$\Pi_{Ruggedising} = e^{0,7*(1-recom-grade)} \quad (50)$$

wobei

$$recom - grade = \frac{1}{225} * \sum_i^{Recommendations} Recom_Weight_i * Satisfaction_mark_i \quad (51)$$

Aufgrund der in diesem Kontext zu tiefgreifend werdenden Anwendung der Empfehlungen, wird der gesamte Faktor $\Pi_{Ruggedising}$ für die nachfolgenden Rechnungen laut FIDES auf 1,7 festgelegt [30].

$\lambda_{Wear\ out}$ ist der auf der Weibullverteilung basierte Teil der Gesamtausfallrate λ und repräsentiert die exponentiell ansteigende Ausfallrate in Abhängigkeit der Zeit aufgrund des Verschleißes und der daraus resultierenden begrenzten Lebensdauer. Die Ausfallrate $\lambda_{Wear\ out}$ setzt sich je nach Art des Bauteils aus unterschiedlichen Faktoren zusammen, in diesem Fall setzt sie sich aus Gleichung (52) zusammen.

$$\lambda_{Wear\ out} = 0,105 * 10^9 * \frac{\min(MPP, MC)^{\beta-1}}{(DDV_{calendar})^{\beta}} \quad (52)$$

Der Zähler verlangt den Minimalwert von MPP (Periodic Preventative Maintenance) oder MC (Corrective Maintenance). Die MPP beschreibt die durchschnittliche Zeit zwischen zwei präventiven Wartungen, MC die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Wartungen aufgrund von Ausfällen durch Verschleiß. Da in diesem Szenario keine präventiven Wartungen stattfinden, kann MC als MPP angenommen werden. Der Weibull-Formfaktor β beträgt laut FIDES 2,2 [30].

$$MC = DDV_{calendar} * 6,579^{\frac{1}{\beta}} \quad (53)$$

Die Zeit $DDV_{calendar}$ [h] beschreibt die Summe der Lebensdauern des Moduls in Abhängigkeit der Phasendauern und deren Einflussfaktoren. Dabei gilt:

$$DDV_{calendar} = \left(\sum_i^{Phases} \left(\frac{t_{annual}}{8760} \right)_i * \left(\frac{1}{DDV} \right)_i \right)^{-1} \quad (54)$$

Falls der Hersteller Angaben über die Lebensdauer L_{10} angibt, kann DDV als solches angenommen werden. DDV beträgt in den Stillstandsphasen 0. Da in diesem Fall keine expliziten Lebensdauern vorgegeben sind, kann DDV alternativ berechnet werden:

$$DDV = 79200 * \Pi_{Type} * [3,53 - 0,744 * Ln(B)] * e^{-Ea*11604*\left(\frac{1}{313} - \frac{1}{T+273}\right)} * \left(\frac{V}{3000}\right)^{-m} \quad (55)$$

Der Faktor \prod_{Type} ist abhängig von der Art des Lagers und der Art der Versorgung. In diesem Fall handelt es sich um einreihige Kugellager. Der Elektromotor wird mit Wechselstrom angetrieben. Resultierend aus dieser Konfiguration beträgt der Faktor laut FIDES 0,7. Die beiden weiteren konstanten Faktoren Ea und m sind ebenfalls abhängig von der Lagerart und betragen in diesem Fall 0,4 und 1,23. Die Variable B [dBA] gibt die Lautstärke an und wird aufgrund fehlender Informationen geschätzt. Für dieses Szenario wird B auf 70 festgelegt und ist in jeder Phase des Betriebs gleich. Die Temperatur in der Nähe des Kugellager T berechnet sich identisch zu Gleichung (44). Die Drehzahl V [rpm] entspricht der Drehzahl des Bohrers unter Last von 85 Umdrehungen pro Minute. Ebenfalls muss hier erwähnt werden, dass die tatsächliche Drehzahl außerhalb der geforderten Werte liegt und es dadurch zu verfälschten Ergebnissen kommen kann. Anschließend werden die Werte miteinander verglichen, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu verhindern.

Da der Grund für eine begrenzte Lebensdauer des Ventilators auf den Verschleiß, der auf die Kugellager zurückzuführen ist, wird zusätzlich eine Berechnung der Ausfallrate $\lambda_{Wear\ out}$ mit Hilfe der in Kapitel 4.2 ermittelten Lebensdauern L_{10} der Kugellager durchgeführt.

5.5 Alternative Vorgehensweise

Im Folgenden Abschnitt wird die Berechnung der Ausfallrate des gesamten Moduls mit Hilfe der im NSWC-10 angegebenen Grundausrfallraten erläutert. Als Beispiel werden alle Werte aus dem Erdszenario verwendet. In diesem Kontext werden mehrere Herangehensweisen verwendet, um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten. Bei der ersten Herangehensweise wird Gleichung (40) mit den Grundausrfallraten der restlichen Bauteile ergänzt. Da die in der FIDES ermittelte Ausfallrate die Ausfallrate des Elektromotors repräsentiert, werden lediglich die Ausfallraten der Dichtung und des Bohrers ergänzt. Dafür werden die bisherigen ermittelten Ergebnisse für alle nachfolgenden Berechnungen in die Einheit FIT umgerechnet. Der Umrechnungsfaktor von [failures/million hours] zu FIT beträgt 1000. Damit beträgt die Grundausrfallrate für die Dichtung $\lambda_{SE,B}$ 22.800 FIT, die Ausfallrate des Bohrers λ_B beträgt demnach 606.070 FIT.

Die Ausfallrate dieser Vorgehensweise wird als λ_l bezeichnet. Die Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls λ_l [FIT] erfolgt über:

$$\lambda_l = \lambda_{Cst} + \lambda_{Wear\ out} + \lambda_B + \lambda_{SE,B} \quad (56)$$

λ_l beträgt im Erdszenario 630.365,24 FIT, umgerechnet 630,370 [failures/million hours]. Dieser Wert erscheint hinsichtlich der Größenordnung sinnvoll zu sein. Jedoch muss beachtet werden, dass die Ausfallrate des Elektromotors lediglich einen marginalen Anteil an der Gesamtausfallrate hat.

Der nächste Ansatz versucht die Einflussfaktoren für die zusätzlichen Bauteile miteinzubeziehen, sodass λ_{0_Fan} aus Gleichung (42) mit jeder Grundausrfallrate ersetzt und anschließend aufsummiert wird. Somit ergeben sich drei $\lambda_{Physical}$, bei denen alle Einflussfaktoren berücksichtigt werden. λ_x repräsentiert die Grundausrfallraten der übrigen Bauteile.

$$\lambda_2 = \sum_x^B \left(\lambda_x * \sum_i^{Phases} \left(\frac{t_{annual}}{8760} \right)_i * \left((\Pi_{Thermal} + \Pi_{TCy} + \Pi_{Mechanical} + \Pi_{RH})_i * (\Pi_{Induced})_i \right) \right) \quad (57)$$

Das Ergebnis für λ_2 würde bereits in dieser Phase der Berechnung in einer unrealistischen Größenordnung liegen, sodass dieser Ansatz nicht weitergeführt wird.

Abschließend lässt sich sagen, dass der Versuch zur Berechnung der Gesamtausfallrate des Bohrmoduls unter Einbezug der Wert des NSW-10 in die FIDES nicht aussagekräftig ist.

6 Auswertung

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse zusammen und setzt diese in einen Zusammenhang. Dabei werden die wichtigsten Einflussfaktoren der beiden Standards ermittelt, deren Grenzen aufgezeigt und die Mond- und Erdszenarien miteinander verglichen.

6.1 NSWC-10

Bei der Analyse der Gesamtausfallrate $\lambda = 1229,77$ [failures/million hours] des Moduls im Erdszenario fällt auf, dass das Zahnrad und der Bohrer die weitaus größten Effekte auf die Ausfallrate aufweist. Ein ähnlicher Effekt ist bei der Gesamtausfallrate $\lambda = 1293,60$ [failures/million hours] des Moduls im MondszENARIO tagsüber zu erkennen. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass die exakte Ausfallrate der Dichtung λ_{SE} und des Bohrers λ_B aufgrund fehlender Informationen geschätzt werden musste. Die weitaus größte Ausfallrate weist jedoch das MondszENARIO in Nacht mit $\lambda = 2564,93$ [failures/million hours] auf. In diesem Szenario hat die Ausfallrate λ_{SE} mit 1665,93 [failures/million hours] aufgrund der niedrigen Temperaturen den größten Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Moduls.

Der größte Unterschied hinsichtlich der Ausfallraten zeigt sich hinsichtlich der Dichtung. Dabei hängt es stark davon ab, welches Material für welches Szenario verwendet wird.

Durch den niedrigeren Reibungskoeffizienten bei Verwendung von Molybdändisulfid in Umgebungen mit geringem Umgebungsdruck kann angenommen werden, dass sich dieser Effekt ebenfalls positiv auf die Lebensdauer des Kugellagers auswirken kann. Lediglich niedrige Temperaturen erhöhen die benötigte Leistung zum Erhalt einer geforderten Drehzahl. Es ist zu erwarten, dass sich dies lebensdauermindernd auswirkt. Im Gegensatz dazu kann es dennoch vorkommen, dass niedrige Temperaturen die Lebensdauer einiger mechanischer Bauteile erhöhen kann. So ist es beispielsweise bei der Welle der Fall.

Der NSWC-10 fordert im Gegensatz zur FIDES keine Phasenmodellierung und beschränkt sich ausschließlich auf konstruktive Kriterien. Dadurch können wichtige Faktoren, wie beispielsweise der Herstellungsprozess, die Einsatzumgebung oder die Qualifizierung der Anwender, kaum bis gar nicht erfasst werden. Potential für weitere mögliche Ungenauigkeiten bietet der Fakt, dass keine metrischen Einheiten verwendet werden. Dadurch kann es im Laufe der Berechnungen zu Abweichungen der Ergebnisse aufgrund von Rundungsfehlern kommen.

6.2 FIDES

Die FIDES versucht mit der anfänglichen Phasenmodellierung bestmöglich den täglichen Arbeitsablauf des Moduls wiederzugeben, externe Einflussfaktoren können präzise miteinbezogen werden. Sie eignet sich besonders für zeitlich begrenzte Missionen, welche sich durch extreme Umweltgegebenheiten oder starke Temperaturschwankungen in Bauteilen auszeichnen.

Zur Berechnung der Gesamtausfallrate λ wurde zunächst die Summe der Ausfallrate $\lambda_{physical}$ berechnet und anschließend mit der Grundaufallrate λ_{0_Fan} multipliziert. Um die Berechnung übersichtlicher zu

gestalten, wurde die Summe für jede Jahreszeit einzeln berechnet, die Grundaussfallrate λ_{0_Fan} zeitweilig nicht miteinbezogen und für das Endergebnis aufsummiert. Die niedrigste Teilsumme der Ausfallrate mit 62,21 FIT weist der Winter auf. Die Teilsumme der Ausfallraten im Frühling und Herbst zeigen mit 66,27 FIT und 66,63 FIT eine geringe Abweichung auf. Im Sommer zeigt sich die höchste Ausfallrate mit 72,84 FIT. Diese Werte sind auf die unterschiedlichen Temperaturen zu verschiedenen Jahreszeiten zurückzuführen. Die Ausfallrate vergrößert sich demnach mit einer steigenden Temperatur. $\lambda_{physical}$ beträgt bei einer Grundaussfallrate von 0,17 FIT des Ventilators und einer Gesamtsumme der Ausfallraten von 267,95 FIT insgesamt 45,55 FIT. Unter Einbezug der Prozessfaktoren \prod_{PM} und $\prod_{Process}$ ergibt sich eine konstante Ausfallrate λ_{Cst} von 291,52 FIT.

Eine ähnliche sinkende Lebensdauer bei steigender Temperatur lässt sich im Vergleich zu der auf dem Verschleiß beruhenden Ausfallraten $\lambda_{Wear\ out}$ erkennen, da die einzige sich ändernde Variable zwischen den Phasen die Temperatur T ist. Die anteilig höchste Lebensdauer $DDV_{calendar}$ weist der Winter mit $7,55 \cdot 10^{-7}$ [h⁻¹] auf. Die Lebensdauern im Frühling und Herbst liegen, ähnlich wie die entsprechenden konstanten Ausfallraten, mit $9,67 \cdot 10^{-7}$ [h⁻¹] und $9,84 \cdot 10^{-7}$ [h⁻¹] nahe beieinander. In einem konstanten Sommerszenario beläuft sich die anteilige Lebensdauer auf $1,34 \cdot 10^{-6}$ [h⁻¹]. Anschließend werden die Werte aufsummiert und in Gleichung (54) eingesetzt, $DDV_{calendar}$ beträgt insgesamt 247.309,25 [h]. Die Ausfallrate $\lambda_{Wear\ out}$ erreicht insgesamt einen Wert von 1186,36 FIT.

Die Gesamtausfallrate des Moduls im Erdszenario λ berechnet sich über Gleichung (40) und beträgt 1477,89 FIT. Auffällig dabei ist, dass die Gesamtausfallrate größtenteils auf den Verschleiß zurückzuführen ist.

Die Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls im Mondszenario erfolgte identisch zur Berechnung im Erdszenario, mit dem Unterscheid, dass das Jahr nicht in vier Jahreszeiten unterteilt wurde. In diesem Szenario wird zwischen Tag und Nacht unterschieden. Die anteilige Ausfallrate $\lambda_{physical}$ ohne Betrachtung der Grundaussfallrate λ_{0_Fan} tagsüber beträgt 325,52 FIT und weist damit eine enorme Abweichung zur Ausfallrate im Winter mit 20,63 FIT auf. Der Grund dafür ist, dass die Temperatur T bedeutend größer ausfällt. Des weiteren ist die FIDES nicht für solche Temperaturbereiche ausgelegt. Mit der Grundaussfallrate von 0,17 FIT des Ventilators beträgt $\lambda_{physical}$ insgesamt 58,85 FIT. Die konstante Ausfallrate λ_{Cst} beträgt in diesem Fall 376,61 FIT.

Die anteilige Lebensdauer $DDV_{calendar}$ tagsüber beträgt $3,90 \cdot 10^{-5}$ [h⁻¹] und $9,42 \cdot 10^{-8}$ [h⁻¹] in der Nacht. Insgesamt beträgt $DDV_{calendar}$ 25596,56 [h] und liegt somit sehr nah an der Lebensdauer L_{10h} des Elektromotors mit 26.500 Stunden [17]. Mit diesen Werten beträgt $\lambda_{Wear\ out}$ 11462,42 FIT und hat damit den größten Effekt auf die Gesamtausfallrate λ . Die Gesamtausfallrate λ beträgt 11839,04 FIT.

Der Versuch, die Ausfallraten des NSWC-10 für eine erweiterte Berechnung der Ausfallrate in der FIDES zu verwenden, liefert keine aussagekräftigen Ergebnisse.

7 Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die zwei Szenarien erläutert, an denen sich die Berechnungen der Zuverlässigkeit des Bohrmoduls orientieren sollen. Die Standortgegebenheiten im Erdszenario konnten mit Hilfe der vorhandenen Wetterdaten des Standortes Oberpfaffenhofen im Laufe der Arbeit präzise ermittelt werden. Die exakten Gegebenheiten im Mondszenario konnten aufgrund des nicht definierten Standortes teilweise lediglich mit Schätzungen ermittelt werden.

Anschließend erfolgte die Benennung der in dieser Arbeit verwendeten Bauteile, mögliche Drehgeschwindigkeiten des Bohrers wurden ermittelt und Temperaturanstiege der Bauteile festgelegt.

Die anfängliche Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe des NSWC-10 gestaltete sich aufgrund der fehlenden technischen Daten zum Bohrmodul problematisch. Alle Werte basieren auf einem fiktiven Bohrmodul, dessen Werte größtenteils geschätzt werden mussten. Während der Zuverlässigkeitsanalyse mit der Hilfe des NSWC-10 wurden neben den herkömmlichen Einflussfaktoren und Berechnungen spezifische Gegebenheiten des Mondszenarios berücksichtigt. So wurde während der Berechnung der Ausfallrate des Kugellagers zusätzlich berücksichtigt, wie sich das Kugellager bei Verwendung eines Trockenschmierstoffes im Vakuum und bei niedrigen Temperaturen verhält.

Um die Aussagekraft der Ausfallrate der Welle zu erhöhen, wurde ergänzend die Zugfestigkeit der Welle bei Temperaturen von -55 °C berücksichtigt. Entgegen den Erwartungen steigt die Lebensdauer der Welle aufgrund der zunehmenden Zugfestigkeit bei tiefen Temperaturen.

Damit die Zuverlässigkeit der Dichtung exakt bestimmt werden konnte, wurden für das Erd- und Mondszenario zwei Dichtungen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften verwendet. Besonders im Hinblick auf die Temperaturen zeigt sich, dass der Temperaturfaktor maßgeblich von dem verwendeten Material abhängig ist.

Hervorzuheben ist die Ausfallrate des Bohrers, welche mit keinem der beiden Standards berechnet werden konnte und somit nicht als endgültig angenommen werden kann. Diese wurde alternativ beruhend auf der Zusammensetzung des Gesteins und der Dauer einer einzelnen Bohrung ermittelt.

Gleichwohl erscheinen sich die berechneten Ausfallraten, das Mondszenario in der Nacht ausgenommen, in einer sinnvollen Größenordnung zu befinden. Der Vergleich der Ausfallraten zeigt letztlich, dass besonders extreme Temperaturen einen großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Moduls haben. Weitere Einflussfaktoren wie eine erhöhte Strahlung und das annähernde Vakuum auf dem Mond haben lediglich marginale Effekte auf die Zuverlässigkeit.

Die Zuverlässigkeitsanalyse mit Hilfe der FIDES basiert auf einer Phasenmodellierung, bezieht den Herstellungsprozess mit ein und berücksichtigt externe Einflussfaktoren. Bei der Phasenmodellierung wurden zunächst die vorhandenen Phasen eines Tages definiert, die Zeiten der jeweiligen Phasen bestimmt und die Einflussfaktoren ermittelt. Mit diesem Vorgehen wurden für beide Szenarien detaillierte Tabellen mit sämtlichen Phasen, Dauern und Faktoren erarbeitet. Diese Tabellen dienen als Variablen für die Berechnungen und beinhalten alle relevanten Informationen.

Da die FIDES allgemein nicht für diese Art von Bauteilen ausgelegt ist, wurde die Berechnung auf der Grundlage eines ähnlichen Bauteils durchgeführt. Im Vergleich zur ersten Analyse zeigt sich ebenfalls, dass sich extreme Temperaturen negativ auf die Lebensdauer auswirken. Des Weiteren ist die Ausfallrate im Mondscenario signifikant größer als die im Erdszenario, auch wenn der Faktor zur Bestimmung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit auf die Bauteile im Mondscenario aufgrund der Gegebenheiten null beträgt.

Es muss jedoch angemerkt werden, dass die FIDES ausschließlich für einen kleinen Teil des Bohrmoduls verwendet werden konnte. Zusätzlich sollten die Ergebnisse nicht als endgültig angesehen werden, da die FIDES für keines der vorab definierten Bauteile geeignet ist.

Schlussendlich konnte in beiden Zuverlässigkeitsanalysen gezeigt werden, dass, unabhängig des Szenarios, hohe Temperaturen und Temperaturschwankungen mitunter einen signifikanten Effekt auf die Lebensdauer der Bauteile haben.

8 Ausblick

Der Versuch zur Durchführung einer Zuverlässigkeitsanalyse mit Berücksichtigung der auf dem Mond herrschenden Umwelteinflüsse und Gegebenheiten konnte schlussendlich nicht vollends durchgeführt werden. Berechnungen einer Ausfallrate des Bohrmoduls in Abhängigkeit zur bestehenden Gesteinsdichte konnten aufgrund fehlender Daten zum Verschleiß eines Bohrers unter Anwendung nicht durchgeführt werden. Eine weitere anfangs geforderte Zielsetzung, der Vergleich mit raumfahrtspezifischen Bauteilen, konnte ebenfalls aufgrund eines Mangels verwendbarer Daten nicht umgesetzt werden.

Da die Berechnungen durch viele Schätzungen keine präzise Aussage über die tatsächliche Zuverlässigkeit des Moduls angeben können, ist es notwendig, die Berechnungen mit konkreten Werten zu wiederholen. Dies setzt voraus, dass alle konstruktiven Eigenschaften vorab gegeben sind. Zusätzlich müssten unter anderem die Hersteller der Bauteile Auskunft über die jeweiligen Prozessabläufe liefern, sofern nicht eigens produziert.

Sollten weitere Analysen für Missionen auf der Mondoberfläche stattfinden, wäre die Verwendung anderer möglicher Standards oder Normen aufgrund der eingeschränkten Temperaturamplitude sinnvoll. Um zu überprüfen, welcher Standard für das Mondszenario eine präzisere Auskunft über die Zuverlässigkeit gibt, könnte mit Hilfe einer Simulation ein Vergleich aufgestellt werden. Anschließend werden die berechneten Werte mit den simulierten Werten verglichen und auf mögliche Abweichungen oder Überschneidungen überprüft. An diese Thematik anknüpfend würde sich eine Ausarbeitung möglicher neuer Berechnungen oder die Berücksichtigung zusätzlicher Faktoren für Extremszenarien anbieten.

Besonders im Hinblick auf die fehlenden Informationen zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer eines Bohrers in diesem speziellen Szenario wäre es sinnvoll, einen Versuch durchzuführen. Es könnte überprüft werden, welchen Einfluss die Gesteinszusammensetzung und Dichte auf die Zuverlässigkeit des Bohrers in Abhängigkeit der Drehgeschwindigkeit haben.

Ebenfalls interessant ist eine präzisere Ermittlung der Zuverlässigkeit der elektrischen Bauteile, welche in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden. Dabei würden explizit die elektrischen Kleinstbauteile wie Kondensatoren und Widerstände betrachtet. Für diesen Fall wäre anzuraten, den Aufbau der Elektrik und die elektrischen Bauteile anhand eines ähnlichen Szenarios zu erarbeiten. Weiterführenden könnte zusätzliche der gesamte Roboter im Hinblick auf die Zuverlässigkeit überprüft werden.

Einen interessanten Aspekt stellt eine weitere mögliche Simulation dar, welche die Standards auf ihre Aussagekraft für Extremszenarien überprüft. So wäre es sinnvoll, wenn die bereits konkret ermittelten Werte durch eine Reihe unterschiedlicher Werte ergänzt werden. Dabei könnten beispielsweise Temperaturen bis 0 K eingesetzt werden, um zu sehen, wie sich der Temperaturfaktor in diesen Grenzfällen verhält.

9 Referenzen

- [1] National Aeronautics and Space Administration, „Apollo to Artemis: Drilling on the Moon,“ 27 Juli 2021. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/feature/apollo-to-artemis-drilling-on-the-moon>. [Zugriff am 05.04.2022].
- [2] International Electrotechnical Commission, „Area: 192: Dependability,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/index?openform&part=192>. [Zugriff am 05. April 2022].
- [3] L. Perlitz, „Eine Simulation von Multi-System-Szenarien zum Vergleich der Effizienz zwischen zuverlässigkeitsadaptiven und konventionellen Systemen zur Optimierung von Instandhaltungsstrategien,“ Mülheim an der Ruhr, 2021.
- [4] National Aeronautics and Space Administration, *LUNAR RECONNAISSANCE ORBITER: Temperature Variation on the Moon*, 2014. [Online]. Available: <https://lunar.gsfc.nasa.gov/images/lithos/LROlitho7temperaturevariation27May2014.pdf>. [Zugriff am 03.04.2022].
- [5] R. J. Plinninger, G. Spaun & K. Thuro, „PREDICTION AND CLASSIFICATION OF TOOL WEAR IN DRILL AND BLAST TUNNELLING,“ *Engineering Geology for Developing Countries - Proceedings of 9th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*, pp. 2226-2236, 2002. [Online]. Available: http://www.plinninger.eu/images/pdfs/2002_iaeg_durban_pli.pdf. [Zugriff am 29. März 2022].
- [6] National Aeronautics and Space Administration, *Exploring the moon – a Teacher’s Guide with activities for Earth and Space Sciences*, 1997. [Online]. Available: https://er.jsc.nasa.gov/seh/Exploring_The_Moon.pdf. [Zugriff am 08.02.2022].
- [7] M. A. Wiczorek et al., „The Crust of the Moon as Seen by GRAIL,“ *Science*, pp. 671-675, 8 Februar 2013. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/233881338_The_crust_of_the_moon_as_seen_by_GRAIL. [Zugriff am 07.02.2022].
- [8] G. Dreibus-Kapp und L. Schultz, „Chemismus und Bildung des Erdmondes - Ergebnisse aus Untersuchungen der Mondproben,“ *Sterne und Weltraum*, pp. 742-752, 1999. [Online]. Available: https://www.spektrum.de/fm/976/SUW_1999_09_S742.pdf. [Zugriff am 08.02.2022].
- [9] E. Kuphal, *Den Mond neu entdecken - Spannende Fakten über Entstehung, Gestalt und Umlaufbahn unseres Erdtrabanten*, Berlin: Springer Verlag, 2013.
- [10] D. R. Williams, „Moon Fact Sheet,“ 20 Dezember 2021. [Online]. Available: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>. [Zugriff am 01.03.2022].
- [11] Wetterdienst, „Klima Oberpfaffenhofen, Oberbayern,“ 2022. [Online]. Available: https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Oberpfaffenhofen_Oberbayern_Wessling_Oberbayern/Klima/. [Zugriff am 20. Februar 2022].

- [12] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „DLR-Rover Scout trainiert für Mars und Mond,“ 23 Dezember 2021. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/04/20211223-dlr-rover-scout-trainiert-fuer-mars-und-mond.html>. [Zugriff am 8 Februar 2022].
- [13] Q. Quan et al., „On Modeling Drilling Load in Lunar Regolith Simulant,“ *Chin. J. Mech. Eng. (2018)* 31:20, 2018. [Online]. Available: <https://cjme.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s10033-018-0207-8.pdf>. [Zugriff am 16 März 2022].
- [14] Naval Surface Warfare Center, Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment (NSWC-10), Maryland, 2012.
- [15] SKF, „Kugellager 6013-2RS1,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/de/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6013-2RS1>. [Zugriff am 20 Februar 2022].
- [16] H. Wittel et al., Roloff/Matek – Maschinenelemente Formelsammlung 14. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2018.
- [17] H. Wittel et al., Roloff/Matek - Maschinenelemente Tabellenbuch, 23. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2017.
- [18] H. Wittel et al., Roloff/Matek – Maschinenelemente – Normung – Berechnung – Gestaltung, 23. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2017.
- [19] J. Sikorski & W. Pawlowski, „Internal Friction of Ball Bearings at Very Low Temperatures,“ *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, pp. 235-242, 2 März 2020. [Online]. Available: https://www.sv-jme.eu/?ns_articles_pdf=/ns_articles/files/ojs/6398/public/6398-36113-1-PB.pdf&id=6449. [Zugriff am 22 März 2022].
- [20] Oelcheck, „Wassergehalt in Ölen und Fetten,“ [Online]. Available: <https://de.oelcheck.com/wiki/wassergehalt/>. [Zugriff am 20 Februar 2022].
- [21] National Aeronautics and Space Administration, BEARING ENDURANCE TESTS IN VACUUM FOR SPATTERED MOLYBDENUM DISULFIDE FILMS, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1975. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19750006982/downloads/19750006982.pdf>. [Zugriff am 25 März 2022].
- [22] L. C. Cadwallader, „Failure Rate Estimates for Passive Mechanical Components,“ Idaho National Laboratory, Idaho Falls, 2018. [Online]. Available: https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/Sort_7467.pdf. [Zugriff am 20 März 2022].

- [23] C. Zheng & W. Yu, „Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel,“ *National Safety Engineering Technology Research Center for Pressure Vessels and Pipelines*, 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320848781_Effect_of_low-temperature_on_mechanical_behavior_for_an_AISI_304_austenitic_stainless_steel. [Zugriff am 1 März 2022].
- [24] D. Edelstahlwerke, „WERKSTOFFDATENBLATT X6CrNiMoTi17-12-2 1.4571,“ Swiss Steel Group, 2 Dezember 2015. [Online]. Available: https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4571_de.pdf. [Zugriff am 5 April 2022].
- [25] Mahr, „Internationale Vergleichstabelle,“ 2006. [Online]. Available: https://www.martin-olten.ch/db/daten/dokumente/rauheitsklassen_int_vergleichstabelle_mahr.pdf. [Zugriff am 18 Februar 2022].
- [26] R. Hatton, „Reliable - Cryogenic and Low Temperature Applications,“ AESSEAL plc, Global Technology Centre, Rotherham, U.K., 2021. [Online]. Available: <https://static.aesseal.com/industry/LIT-UK-L-Cryogenic.pdf>. [Zugriff am 27 März 2022].
- [27] K. Zacny, „LunarVader: Testing of a 1 meter Lunar Drill in a 3.5 meter Vacuum Chamber and in the Antarctic Lunar Analog Site,“ 2012. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6187047>. [Zugriff am 4 April 2022].
- [28] S. Eberlin & B. Hock, *Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme - Eine Einführung in die Praxis*, Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag, 2014.
- [29] National Aeronautics and Space Administration, „NUCLEAR AND SPACE RADIATION EFFECTS ON MATERIALS,“ 1970. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710015558/downloads/19710015558.pdf>. [Zugriff am 2 April 2022].
- [30] FIDES Group, *Reliability Methodology for Electronic Systems (FIDES guide 2009 Edition A)*, 2010.
- [31] T. Tudorancea, „Oberpfaffenhofen, Deutschland: Klimakarte,“ 2022. [Online]. Available: https://www.tititudorancea.com/z/klima_oberpfaffenhofen_germany.htm. [Zugriff am 2 April 2022].

Anhang

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (x2)	0,007391134	failures/million revolutions
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing	0,003695567	failures/million revolutions
$\lambda_{BE,B}$	/	$2 \cdot 10^5 / L_{10}$	0,001479837	failures/million revolutions
C_v	0,875	Multiplying factor for lubricant	/	-
C_{CW}	/	Multiplying factor for water contaminant level	1,268459375	-
C_t	/	Multiplying factor for operating temperature	1	-
C_{SF}	2,25	Multiplying factor for operating service conditons	/	-
L_{10}	/	Lifetime	135,15	millions of revolutions
L_{10h}	26500	Lifetime	/	hours
n	85	Revolutions	/	rpm
CW	0,225	Percentage of water in the lubricant	/	%
T_o	95	Operating temperature of the bearing	/	°C

Anhang 1: Berechnung der Ausfallrate des Kugellagers für das Erdszenario mit herkömmlichem Schmierstoff.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (x2)	0,012150058	failures/million revolutions
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing	0,006075029	failures/million revolutions
$\lambda_{BE,B}$	/	$2 \cdot 10^5 / L_{10}$	0,001479837	failures/million revolutions
C_v	1,45	Multiplying factor for lubricant	/	-
C_{CW}	/	Multiplying factor for water contaminant level	1,04	-
C_t	/	Multiplying factor for operating temperature	1,209903032	-
C_{SF}	2,25	Multiplying factor for operating service conditons	/	-
L_{10}	/	Lifetime	135,15	millions of revolutions
L_{10h}	26500	Lifetime	/	hours
n	85	Revolutions	/	rpm
CW	0	Percentage of water in the lubricant	/	%
T_o	195	Operating temperature of the bearing	/	°C

Anhang 2: Berechnung der Ausfallrate des Kugellagers für das MondszENARIO am Tag mit dem Festschmierstoff Molybdändisulfid.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (x2)	0,016770433	failures/million revolutions
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing	0,008385216	failures/million revolutions
$\lambda_{BE,B}$	/	$2 \cdot 10^5 / L_{10}$	0,001479837	failures/million revolutions
C_v	1,45	Multiplying factor for lubricant	/	-
C_{CW}	/	Multiplying factor for water contaminant level	1,04	-
C_t	/	Multiplying factor for operating temperature	1,67	-
C_{SF}	2,25	Multiplying factor for operating service conditons	/	-
L_{10}	/	Lifetime	135,15	millions of revolutions
L_{10h}	26500	Lifetime	/	hours
n	85	Revolutions	/	rpm
CW	0	Percentage of water in the lubricant	/	%
T_o	-55	Operating temperature of the bearing	/	°C

Anhang 3: Berechnung der Ausfallrate des Kugellagers für das MondszENARIO in der Nacht mit dem Festschmierstoff Molybdändisulfid

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{SH,B}$	/	Shaft base failure rate (converted)	0,00043137	failures/million cycles
$(\lambda_{SH,B})$	/	Lifetime	2318181818	cycles to failure
$(\lambda_{SH,B})$	/	Lifetime	454545,455	hours to failure
$(\lambda_{SH,B})$	2,2	Failure rate	/	failures/million hours
n	85	Revolutions	/	rpm

Anhang 4: Umrechnung der Einheiten von [failures/million hours] zu [failures/million cycles] in Abhängigkeit der Nenndrehzahl n .

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{AS/SH}$	/	Shaft failure rate	4,575E-07	failures/million cycles
$\lambda_{SH,B}$	/	Shaft base failure rate	0,00043137	failures/million cycles
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,42808925	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1,06935484	-
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
C_{SC}	/	Stress concentration factor for shaft discontinuities	2,02834759	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1,06935484	-
T_{AT}	203	Operating Temperature	/	°F
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,42808925	-
T_S	155	Tensile strength of material	/	kpsi
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
F	33,9	Fluid radial unbalance force or shaft weight	/	lb
l_1	18,11	Shaft length l_1	/	in
l_2	5,512	Shaft length l_2	/	in
E	29000000	Modulus of elasticity of shaft material	/	lbs/in ²
I_1	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_1	2,10499487	in ⁴
I_2	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_2	1,52788079	in ⁴
d_1	2,559	Shaft diameter d_1	/	in
d_2	2,362	Shaft diameter d_2	/	in
C_{SC}	/	Shaft stress concentration factor	2,02834759	-
$C_{SC,R}$	/	Stress concentration factor due to transition between shaft sections	1,02834759	-
$C_{SC,G}$	1	Stress concentration factor for shaft grooves	/	-
r	0,63	Radius of fillet	/	in
D	2,362	Initial shaft diameter	/	in
d	2,559	Transitioned shaft diameter	/	in

Anhang 5: Berechnung der Ausfallrate der Welle für das Erdszenario.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{AS/SH}$	/	Shaft failure rate	5,817E-07	failures/million cycles
$\lambda_{SH,B}$	/	Shaft base failure rate	0,00043137	failures/million cycles
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,42808925	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1,35967742	-
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
C_{SC}	/	Stress concentration factor for shaft discontinuities	2,02834759	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1,35967742	-
T_{AT}	383	Operating Temperature	/	°F
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,42808925	-
T_S	155	Tensile strength of material	/	kpsi
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
F	33,9	Fluid radial unbalance force or shaft weight	/	lb
l_1	18,11	Shaft length l_1	/	in
l_2	5,512	Shaft length l_2	/	in
E	29000000	Modulus of elasticity of shaft material	/	lbs/in ²
I_1	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_1	2,10499487	in ⁴
I_2	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_2	1,52788079	in ⁴
d_1	2,559	Shaft diameter d_1	/	in
d_2	2,362	Shaft diameter d_2	/	in
C_{SC}	/	Shaft stress concentration factor	2,02834759	-
$C_{SC,R}$	/	Stress concentration factor due to transition between shaft sections	1,02834759	-
$C_{SC,G}$	1	Stress concentration factor for shaft grooves	/	-
r	0,63	Radius of fillet	/	in
D	2,362	Initial shaft diameter	/	in
d	2,559	Transitioned shaft diameter	/	in

Anhang 6: Berechnung der Ausfallrate der Welle für das MondszENARIO tagsüber.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{AS/SH}$	/	Shaft failure rate	3,7598E-07	failures/million cycles
$\lambda_{SH,B}$	/	Shaft base failure rate	0,00043137	failures/million cycles
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,37621689	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1	-
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
C_{SC}	/	Stress concentration factor for shaft discontinuities	2,02834759	-
C_T	/	Material temperature multiplying factor	1	-
T_{AT}	-67	Operating Temperature	/	°F
C_F	/	Shaft surface finish multiplying factor	0,37621689	-
T_S	184,5	Tensile strength of material	/	kpsi
C_{DY}	/	Shaft displacement multiplying factor	0,00114218	-
F	33,9	Fluid radial unbalance force or shaft weight	/	lb
l_1	18,11	Shaft length l_1	/	in
l_2	5,512	Shaft length l_2	/	in
E	29000000	Modulus of elasticity of shaft material	/	lbs/in ²
I_1	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_1	2,10499487	in ⁴
I_2	/	Moment of inertia ($\pi d^4/64$) I_2	1,52788079	in ⁴
d_1	2,559	Shaft diameter d_1	/	in
d_2	2,362	Shaft diameter d_2	/	in
C_{SC}	/	Shaft stress concentration factor	2,02834759	-
$C_{SC,R}$	/	Stress concentration factor due to transition between shaft sections	1,02834759	-
$C_{SC,G}$	1	Stress concentration factor for shaft grooves	/	-
r	0,63	Radius of fillet	/	in
D	2,362	Initial shaft diameter	/	in
d	2,559	Transitioned shaft diameter	/	in

Anhang 7: Berechnung der Ausfallrate der Welle für das MondszENARIO in der Nacht.

Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis
λ_{BE} (failures/million hours) x2	37,694783	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million hours)	0,002333225	λ_{GR} (failures/million hours)	51
λ_{BE} (hours to failure) x2	26528,87	$\lambda_{AS/SH}$ (hours to failure)	428591267	λ_{GR} (hours to failure)	19607,84314
λ_{BE} (revolutions to failure) x2	135297236	$\lambda_{AS/SH}$ (cycles to failure)	2,18582E+12	λ_{GR} (cycles to failure)	100000000
λ_{BE} (failures/million revolutions) x2	0,0073911	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million cycles)	4,57495E-07	λ_{GR} (failures/million cycles)	0,01

Anhang 8: Umrechnung der Einheiten von [failures/million revolutions] zu [failures/million hours] im Erdszenario.

Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis
λ_{BE} (failures/million hours) x2	61,965298	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million hours)	0,00296668	λ_{GR} (failures/million hours)	51
λ_{BE} (hours to failure) x2	16138,065	$\lambda_{AS/SH}$ (hours to failure)	337077117,5	λ_{GR} (hours to failure)	19607,84314
λ_{BE} (revolutions to failure) x2	82304131	$\lambda_{AS/SH}$ (cycles to failure)	1,71909E+12	λ_{GR} (cycles to failure)	100000000
λ_{BE} (failures/million revolutions) x2	0,0121501	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million cycles)	5,81702E-07	λ_{GR} (failures/million cycles)	0,01

Anhang 9: Umrechnung der Einheiten von [failures/million revolutions] zu [failures/million hours] im MondszENARIO tagsüber.

Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis	Beschreibung	Ergebnis
λ_{BE} (failures/million hours) x2	85,529208	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million hours)	0,001917515	λ_{GR} (failures/million hours)	51
λ_{BE} (hours to failure) x2	11691,912	$\lambda_{AS/SH}$ (hours to failure)	521508254,3	λ_{GR} (hours to failure)	19607,84314
λ_{BE} (revolutions to failure) x2	59628753	$\lambda_{AS/SH}$ (cycles to failure)	2,65969E+12	λ_{GR} (cycles to failure)	100000000
λ_{BE} (failures/million revolutions) x2	0,0167704	$\lambda_{AS/SH}$ (failures/million cycles)	3,75983E-07	λ_{GR} (failures/million cycles)	0,01

Anhang 10: Umrechnung der Einheiten von [failures/million revolutions] zu [failures/million hours] im MondszENARIO in der Nacht.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_M	/	Total failure rate for the motor system	128,946	failures/million hours
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (converted) (x2)	37,6947833	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	33,8476433	failures/million hours
λ_{BS}	/	Failure rate of brushes (x2)	6,40	failures/million hours
$\lambda_{AS/SH}$	/	Failure rate of the armature shaft (converted)	0,00233323	failures/million hours
λ_{ST}	/	Failure rate of the stator housing	0,001	failures/million hours
λ_{GR}	/	Failure rate of gear	51	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	33,8476433	failures/million hours
$\lambda_{WI/B}$	/	Base failure rate of the electric motor windings	50	failures/million hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	0,67695287	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
C_{dit}	1	Multiplying factor which considers the effects of operation at extreme elevations	/	-
L_I	20000	Expected winding life	/	hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	0,67695287	-
T_r	105	Temperature rating of windings	/	°C
T_D	95	Internal motor temperature during operation	/	°C
k	1	Factor	/	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
V_R	400	Rated Voltage	/	V
V_A	400	Actual Voltage	/	V

Anhang 11: Berechnung der Ausfallrate des Elektromotors für das Erdszenario.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_M	/	Total failure rate for the motor system	192,776	failures/million hours
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (converted) (x2)	61,9652979	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	73,4067042	failures/million hours
λ_{BS}	/	Failure rate of brushes (x2)	6,40	failures/million hours
$\lambda_{AS/SH}$	/	Failure rate of the armature shaft (converted)	0,00296668	failures/million hours
λ_{ST}	/	Failure rate of the stator housing	0,001	failures/million hours
λ_{GR}	/	Failure rate of gear	51	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	73,4067042	failures/million hours
$\lambda_{WI/B}$	/	Base failure rate of the electric motor windings	50	failures/million hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	1,46813408	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
C_{dit}	1	Multiplying factor which considers the effects of operation at extreme elevations	/	-
L_I	20000	Expected winding life	/	hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	1,46813408	-
T_r	180	Temperature rating of windings	/	°C
T_D	195	Internal motor temperature during operation	/	°C
k	1	Factor	/	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
V_R	400	Rated Voltage	/	V
V_A	400	Actual Voltage	/	V

Anhang 12: Berechnung der Ausfallrate des Elektromotors für das Mondszenario tagsüber.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_M	/	Total failure rate for the motor system	292,932	failures/million hours
λ_{BE}	/	Failure rate of bearing (converted) (x2)	85,5292075	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	150	failures/million hours
λ_{BS}	/	Failure rate of brushes (x2)	6,40	failures/million hours
$\lambda_{AS/SH}$	/	Failure rate of the armature shaft (converted)	0,00191752	failures/million hours
λ_{ST}	/	Failure rate of the stator housing	0,001	failures/million hours
λ_{GR}	/	Failure rate of gear	51	failures/million hours
λ_{WI}	/	Failure rate of electric motor windings	150	failures/million hours
$\lambda_{WI, B}$	/	Base failure rate of the electric motor windings	50	failures/million hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	3	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
C_{alt}	1	Multiplying factor which considers the effects of operation at extreme elevations	/	-
L_I	20000	Expected winding life	/	hours
C_T	/	Multiplying factor which considers the effects of ambient temperature on the base failure rate	2,4613E-06	-
T_r	180	Temperature rating of windings	/	°C
T_o	-55	Internal motor temperature during operation	/	°C
k	1	Factor	/	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effects of electrical source voltage variations	1	-
V_R	400	Rated Voltage	/	V
V_A	400	Actual Voltage	/	V

Anhang 13: Berechnung der Ausfallrate des Elektromotors für das MondszENARIO in der Nacht.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{SE}	/	Failure rate of dynamic seal	494,755095	failures/million hours
$\lambda_{SE,B}$	/	Base failure rate	22,8	failures/million hours
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
C_f	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,21	-
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_{PV}	/	Multiplying factor which considers the effect of the pressure-velocity coefficient on the base failure rate	3	-
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
Q_f	0,027	Allowable leakage	/	in ³ /min
C_f	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
f	28	Surface finish	/	µin RMS
C_V	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
v	x	Dynamic viscosity of fluid being used	/	lbf-min/in ²
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,21	-
t	/	Factor	2,611111111	-
T_R	250	Rated temperature of seal	/	°F
T_O	203	Operating temperature of seal	/	°F
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_D	x	System filter size	/	micron
C_{ID}	10	Standart system filter size	/	micron
GPM_R	x	Rated flow	/	gallons/min
N_{ID}	x	Particles/hour/rated GPM	/	-
C_{PV}	/	PV multiplying factor	3	-
PV_{OP}	/	PV factor for actual seal operation	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-
PV_{DS}	/	PV factor for the original design	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-

Anhang 14: Berechnung der Ausfallrate der Dichtung im Erdszenario.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{SE}	/	Failure rate of dynamic seal	494,755095	failures/million hours
$\lambda_{SE,B}$	/	Base failure rate	22,8	failures/million hours
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
C_F	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
C_V	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,21	-
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_{PV}	/	Multiplying factor which considers the effect of the pressure-velocity coefficient on the base failure rate	3	-
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
Q_f	0,027	Allowable leakage	/	in ³ /min
C_F	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
f	28	Surface finish	/	µin RMS
C_V	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
ν	x	Dynamic viscosity of fluid being used	/	lbf·min/in ²
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,21	-
t	/	Factor	3,72222222	-
T_R	450	Rated temperature of seal	/	°F
T_O	383	Operating temperature of seal	/	°F
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_O	x	System filter size	/	micron
C_{10}	10	Standart system filter size	/	micron
GPM_R	x	Rated flow	/	gallons/min
N_{10}	x	Particles/hour/rated GPM	/	-
C_{PV}	/	PV multiplying factor	3	-
PV_{OP}	/	PV factor for actual seal operation	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-
PV_{DS}	/	PV factor for the original design	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-

Anhang 15: Berechnung der Ausfallrate der Dichtung im MondszENARIO tagsüber.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ_{SE}	/	Failure rate of dynamic seal	1665,92706	failures/million hours
λ_{SEB}	/	Base failure rate	22,8	failures/million hours
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
C_f	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
C_v	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,70710678	-
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_{PV}	/	Multiplying factor which considers the effect of the pressure-velocity coefficient on the base failure rate	3	-
C_Q	/	Multiplying factor which considers the effect of allowable leakage on the base failure rate	2,067	-
Q_f	0,027	Allowable leakage	/	in ³ /min
C_f	/	Multiplying factor which considers the effect of surface finish on the base failure rate	1,38865114	-
f	28	Surface finish	/	µin RMS
C_v	/	Multiplying factor which considers the effect of fluid viscosity on the base failure rate	3	-
ν	x	Dynamic viscosity of fluid being used	/	lbf-min/in ²
C_T	/	Multiplying factor which considers the effect of seal face temperature on the base failure rate	0,70710678	-
t	/	Factor	0,5	-
T_R	76	Rated temperature of seal	/	°F
T_O	67	Operating temperature of seal	/	°F
C_N	/	Multiplying factor which considers the effect of contaminations on the base failure rate	4	-
C_O	x	System filter size	/	micron
C_{10}	10	Standart system filter size	/	micron
GPM_R	x	Rated flow	/	gallons/min
N_{10}	x	Particles/hour/rated GPM	/	-
C_{PV}	/	PV multiplying factor	3	-
PV_{OP}	/	PV factor for actual seal operation	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-
PV_{OS}	/	PV factor for the original design	#WERT!	-
DP	x	Pressure differential across seal face	/	lbs/in ²
d	x	Diameter of face seal	/	inches
V	x	Operating speed	/	rpm
k	x	Degree of seal unbalance	/	-

Anhang 16: Berechnung der Ausfallrate der Dichtung im MondszENARIO in der Nacht.

Total failure rate (E)				
Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ	/	Total failure rate	1229,771	failures/million hours
λ_M	128,9457598	Total failure rate for the motor system	/	failures/million hours
λ_{SE}	494,7550947	Failure rate of dynamic seal	/	failures/million hours
λ_B	606,07	Failure rate of blade and bearing assembly	/	failures/million hours

Anhang 17: Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls im Erdszenario.

Total failure rate (M;T)				
Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ	/	Total failure rate	1293,601	failures/million hours
λ_M	192,7759688	Total failure rate for the motor system	/	failures/million hours
λ_{SE}	494,7550947	Failure rate of dynamic seal	/	failures/million hours
λ_B	606,07	Failure rate of blade and bearing assembly	/	failures/million hours

Anhang 18: Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls im MondszENARIO tagsüber.

Total failure rate (M;N)				
Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
λ	/	Total failure rate	2564,929	failures/million hours
λ_M	292,9321251	Total failure rate for the motor system	/	failures/million hours
λ_{SE}	1665,927059	Failure rate of dynamic seal	/	failures/million hours
λ_B	606,07	Failure rate of blade and bearing assembly	/	failures/million hours

Anhang 19: Berechnung der Gesamtausfallrate des Moduls im MondszENARIO in der Nacht.

i	Temperature and humidity				Temperature cycling				Mechanical	Chemical			Induced	
	Phase name	Calendar time (hours)	On/Off	Ambient temperature (°C)	Relativ humidity (%)	ΔT (°C) (Tmax-Tmin)	Number of cycles (per year)	Cycle duration (hours)	Maximum temperature during cycling (°C)	Random vibrations (Gms)	Saline pollution	Environmental pollution	Application pollution	Protection level
Driving (Spring)	1092	Off	8,90	65,67	0	728	1,5	8,90	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Spring)	24,27	On	83,90	10,00	75	728	0,033	83,90	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Spring)	1043,47	On	83,90	10,00	75	728	1,433	83,90	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Spring)	24,27	On	83,90	10,00	75	728	0,033	83,90	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Driving (Summer)	1092	Off	18,19	67,00	0	728	1,5	18,19	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Summer)	24,27	On	93,19	10,00	75	728	0,033	93,19	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Summer)	1043,47	On	93,19	10,00	75	728	1,433	93,19	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Summer)	24,27	On	93,19	10,00	75	728	0,033	93,19	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Driving (Autumn)	1092	Off	9,38	80,33	0	728	1,5	9,38	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Autumn)	24,27	On	84,38	10,00	75	728	0,033	84,38	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Autumn)	1043,47	On	84,38	10,00	75	728	1,433	84,38	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Autumn)	24,27	On	84,38	10,00	75	728	0,033	84,38	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Driving (Winter)	1104	Off	1,83	81,33	0	736	1,5	1,83	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Winter)	24,53	On	76,83	10,00	75	736	0,033	76,83	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Winter)	1054,93	On	76,83	10,00	75	736	1,433	76,83	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Winter)	24,53	On	76,83	10,00	75	736	0,033	76,83	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91

Anhang 20: Phasenmodellierung des Roboters im Erdszenario.

Π Application	Criterion	Level for the Driving Phase	Begründung	P _{notes}	Level for Pre-Bearing Phase	Begründung	P _{notes}	Level for Bearing Phase	Begründung	P _{notes}	Level for Stop-Bearing Phase	Begründung	P _{notes}	Weight Pos
	User type in the phase considered	Unfavourable	Erfolg der Mission als wichtigster Faktor	10	Unfavourable	Erfolg der Mission als wichtigster Faktor	10	Unfavourable	Erfolg der Mission als wichtigster Faktor	10	Unfavourable	Erfolg der Mission als wichtigster Faktor	10	20
	User qualification level in the phase considered	Favourable	Es wird angenommen, dass es sich um hochqualifizierte Anwender handelt	1	Favourable	Es wird angenommen, dass es sich um hochqualifizierte Anwender handelt	1	Favourable	Es wird angenommen, dass es sich um hochqualifizierte Anwender handelt	1	Favourable	Es wird angenommen, dass es sich um hochqualifizierte Anwender handelt	1	10
	System mobility	Severe	Bewegung durch Fahrt	10	Non-aggressive	Keine Bewegung	1	Non-aggressive	Keine Bewegung	1	Non-aggressive	Keine Bewegung	1	4
	Product manipulation	Moderate	Mögliche Manipulation	3,2	Moderate	Mögliche Manipulation	3,2	Moderate	Mögliche Manipulation	3,2	Moderate	Mögliche Manipulation	3,2	15
	Type of electrical network for the system	Non-aggressive	Eigene Stromversorgung	1	Non-aggressive	Eigene Stromversorgung	1	Non-aggressive	Eigene Stromversorgung	1	Non-aggressive	Eigene Stromversorgung	1	4
	Product exposure to human activity	Low	Keine menschliche Interaktion	1	Low	Keine menschliche Interaktion	1	Low	Keine menschliche Interaktion	1	Low	Keine menschliche Interaktion	1	8
	Product exposure to machine disturbances	Severe	In Nähe des Elektromotors	10	Severe	In Nähe des Elektromotors	10	Severe	In Nähe des Elektromotors	10	Severe	In Nähe des Elektromotors	10	3
	Product exposure to the weather	Severe	Außenanwendung	10	Severe	Außenanwendung	10	Severe	Außenanwendung	10	Severe	Außenanwendung	10	2
Π Application		5,45			4,91			4,91			4,91			

Anhang 21: Erläuterung zur Bestimmung des Faktors Π Application.

i	Temperature and humidity				Temperature cycling				Mechanical	Chemical			Induced	
	Phase name	Calendar time (hours)	On/Off	Ambient temperature (°C)	Relativ humidity (%)	ΔT (°C) (Tmax-Tmin)	Number of cycles (per year)	Cycle duration (hours)	Maximum temperature during cycling (°C)	Random vibrations (Gms)	Saline pollution	Environmental pollution	Application pollution	Protection level
Driving (Day)	2184	Off	120,00	0,00	0	1456	1,5	120,00	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Day)	48,54	On	195,00	0,00	75	1456	0,033	195,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Day)	2086,94	On	195,00	0,00	75	1456	1,433	195,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Day)	48,54	On	195,00	0,00	75	1456	0,033	195,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Driving (Night)	2208	Off	-130	0,00	0	1464	1,5	-130,00	0,5	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	5,45
Pre-Drilling (Night)	49,06	On	-55	0,00	75	1464	0,033	-55,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Drilling (Night)	2109,86	On	-55	0,00	75	1464	1,433	-55,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91
Stop-Drilling (Night)	49,06	On	-55	0,00	75	1464	0,033	-55,00	9	Weak	Weak	Weak	Non hermetic	4,91

Anhang 22: Phasenmodellierung des Roboters im MondszENARIO.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	66,27111915	FIT
λ_{0_Fan}	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,934692218	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,934692218	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,934692218	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	610,126283	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	49,87929344	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	610,126283	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,023849269	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006117203	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006117203	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006117203	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	9,67291E-07	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	128874,0352	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	128874,0352	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	128874,0352	hours
Π_{Type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	104,79	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 23: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im Erdszenario des Frühlings.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	72,83566616	FIT
λ_{0_Fan}	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	2,184291158	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	2,184291158	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	2,184291158	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	674,6382425	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	55,15330154	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	674,6382425	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,074500781	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,011834015	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,011834015	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,011834015	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	1,33686E-06	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	93247,18124	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	93247,18124	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	93247,18124	hours
Π_{Type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	115,009	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 24: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im Erdszenario des Sommers.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	66,63158921	FIT
λ_{0_Fan}	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,947172787	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,947172787	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,947172787	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	613,3815723	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	50,14542119	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	613,3815723	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,061236333	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006334685	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006334685	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,006334685	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	9,8402E-07	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	126683,0399	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	126683,0399	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	126683,0399	hours
Π_{Type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	105,318	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 25: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im Erdszenario des Herbstes.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	62,20676074	FIT
λ_{0_Fan}	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,756126863	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,756126863	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1,756126863	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	563,3324987	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	46,04149976	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	563,3324987	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,026207668	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,003616239	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,003616239	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,003616239	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	7,55347E-07	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	166845,5994	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	166845,5994	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	166845,5994	hours
Π_{Type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	97,013	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 26: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im Erdszenario des Winters.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	325,517527	FIT
$\lambda_{0_Fan(E-motor)}$	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	5,96595881	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	5,96595881	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	5,96595881	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1562,73461	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	127,757319	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	1562,73461	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,10940259	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,10940259	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,10940259	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,40953424	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,40953424	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,40953424	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	3,8973E-05	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	6397,0997	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	6397,0997	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	6397,0997	hours
Π_{Type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	227	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 27: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im MondszENARIO tagsüber.

Variable	Eingabe	Beschreibung	Ergebnis	Einheit
$\lambda_{Physical}$	/	Failure rate due to physical contribution	20,63482802	FIT
$\lambda_{0_Fan(E-motor)}$	0,17	Basic failure rate	/	FIT
$\Pi_{Thermo-electrical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Thermo-electrical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,620465874	-
$\Pi_{Thermo-electrical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,620465874	-
$\Pi_{Thermo-electrical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0,620465874	-
γ_{Th}	0,51		/	-
$\Pi_{Tcy Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{Tcy Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	48,62535682	-
$\Pi_{Tcy Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	3,974179298	-
$\Pi_{Tcy Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	48,62535682	-
γ_{Tcy}	0,31		/	-
$\Pi_{Mechanical Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0,08	-
$\Pi_{Mechanical Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
$\Pi_{Mechanical Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	6,109402589	-
γ_{Mech}	0,08		/	-
$\Pi_{RH Driving}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Pre-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
$\Pi_{RH Stop-Drilling}$	/	Factor contributing to physical stress	0	-
γ_{Rh}	0,11		/	-
$\Pi_{Induced Driving}$	/	Factor for contribution of overstress	6,76407711	-
$\Pi_{Induced Pre-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Induced Stop-Drilling}$	/	Factor for contribution of overstress	6,409534245	-
$\Pi_{Application Driving}$	5,45	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Pre-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Application Stop-Drilling}$	4,91	Criterion factor	/	-
$\Pi_{Placement}$	1,6	Factor contributing to overstress	/	-
$\Pi_{Ruggedising}$	1,7	Factor contributing to overstress	/	-
$C_{Sensitivity}$	5,5	$C_{sensitivity}$ factor	/	-
Π_{PM}	1,6	Part manufacturing factor	/	-
$\Pi_{Process}$	4	Process factor	/	-
$DDV_{calendar}$	/	Life	9,42486E-08	hours ⁻¹
β	2,2	Weibull shape factor	/	-
$DDV_{Pre-Drilling}$	/	Life	2674336,514	hours
$DDV_{Drilling}$	/	Life	2674336,514	hours
$DDV_{Stop-Drilling}$	/	Life	2674336,514	hours
Π_{type}	0,7	Factor (Single ball bearing AC)	/	-
B	70	Noise	/	dBa
Ea	0,4	Factor (Single ball bearing)	/	-
T	30	Temperature close to the bearing	/	°C
V	85	Rotation Speed at 100% Load	/	rpm
m	1,23	Factor (Single ball bearing)	/	-

Anhang 28: Berechnung der Teilsumme der Ausfallrate $\lambda_{Physical}$ im Mondszenario in der Nacht.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit von mir selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, durch Zitate als solche gekennzeichnet habe. Ich versichere auch, dass die von mir eingereichte schriftliche Version mit der digitalen Version übereinstimmt. Weiterhin erkläre ich, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde oder Prüfungsstelle vorgelegen hat. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Arbeit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Digitalversion dieser Arbeit zwecks Plagiatsprüfung auf die Server externer Anbieter hochgeladen werden darf. Die Plagiatsprüfung stellt keine Zurverfügungstellung für die Öffentlichkeit dar.

Oberhausen, 15. April 2022

Rico Kösters

