

Titel:

Abschlussbericht Fraunhofer IST**ELMORE**

Projekt: Geschlossene ELEktrochemische Prozesse zur Gewinnung reiner Elemente aus MONdREGolith
Teilvorhaben: TP1
Laufzeit: 01.09.2019 - 31.08.2022

Beschreibung:

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse des Fraunhofer IST für das Projekt ELMORE (Projektzeitraum vom 01.09.2019 - 31.08.2022) zusammen.

**Verteiler
(alphabetisch):**

DLR
TUB-RFT


Autoren:

Datum, Unterschrift_____
Datum, Unterschrift_____
Datum, Unterschrift_____
Datum, Unterschrift

Prüfer: (Projektleiter falls nicht identisch mit Ersteller)


Datum, Unterschrift



	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung.....	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
1.4.1	Angabe bekannter Lösungen, Verfahren und Schutzrechte: Regolithsimulat ...	9
1.4.2	Angabe bekannter Verfahren: Sauerstoffzeugung.....	11
1.4.3	Angabe bekannter Verfahren: Metallerzeugung	13
1.4.4	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	14
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	14
2	Eingehende Darstellung	15
2.1	AP1/1-3 Spezifikation	15
2.2	AP2.1 Auswahl und Beschaffung der Rohmaterialien (RFT)	16
2.3	AP2.2 Aufbereitung der Rohmaterialien (RFT)	16
2.4	AP2.3 Synthese Simulat Typ 1 (RFT).....	18
2.5	AP2.4 Synthese Simulat Typ 2 (RFT).....	18
2.6	AP3.1 Prozessmodellierung (IST)	19
2.7	AP3.2 Versuchsaufbau (IST).....	19
2.8	AP3.3 Prozessentwicklung zur chemischen Auflösung von Regolith (IST)	20
2.9	AP4.1/AP4.2 Elektrochemische Erzeugung der reinen Elemente und Untersuchung der Endprodukte (IST)	24
2.10	AP4.3 Verarbeitungsversuche (RFT).....	25
2.11	AP4.4 Analyse der Prozesseffizienz (IST)	27
2.12	AP5/1-3.....	27
2.13	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweis	28
2.13.1	Kostennachweis RFT	28
2.13.2	Kostennachweis IST	29
2.14	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	29
2.15	Voraussichtlicher Nutzen.....	30
2.16	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt.....	30
2.17	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	31
3	Verwendete Literatur	32

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Für die wissenschaftliche und wirtschaftliche Erschließung des Mondes sind große Mengen unterschiedlicher Materialien notwendig, die aus Kostengründen nicht von der Erde transportiert werden können. Dies betrifft unter anderem Materialien zum Bau von Unterkünften für Astronauten und anderen Infrastrukturen, reine Metalle zum Bau von Werkzeugen und Maschinen und Sauerstoff als Atemluft und Treibstoff. Viele dieser Stoffe sind in der leicht zugänglichen oberen pulverförmigen Schicht des Mondes, dem Regolith, vorhanden. Der Regolith besteht aus den Oxiden von Silizium, Eisen, Titan, Aluminium, Magnesium und weiteren Stoffen. Zur Nutzbarmachung ist ein Prozess unter Weltraumbedingungen nötig, mit dem diese Oxide in reine Elemente umgewandelt werden können und der ohne Verbrauchsmaterialien auskommt. Verbrauchsmaterialien würden den Vorteil der Nutzung von Materialien vor Ort zunichtemachen, da sie von der Erde aus bereitgestellt werden müssten. **Aufgabe dieses Projektes ist die Entwicklung eines Prozesses zur Gewinnung reiner Elemente aus Mondregolith** unter Berücksichtigung der vorherrschenden Bedingungen auf dem Mond.


1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben bestand aus folgenden Partnern:

Fraunhofer IST

TU Braunschweig IRAS, später TU Berlin RFT

Dieses Ziel wurde mittels moderner elektrochemischer Verfahren **in einem nahezu geschlossenen System** erreicht. In einem ersten Prozessschritt wurde der Regolith chemisch aufgelöst und in Ionen überführt. Im nächsten Schritt werden diese Ionen elektrochemisch in ihre Elemente umgewandelt. Dabei werden an der Kathode die unterschiedlichen Metalle abgeschieden, an der Anode entsteht Sauerstoff. Grundlage ist dabei die Verwendung von so genannten ionischen Flüssigkeiten sowohl zur selektiven Extraktion der Oxide als auch zur elektrochemischen Metall- und Sauerstoffgewinnung. Ionische Flüssigkeiten (IL) sind Salze, die bei Raumtemperatur oder geringfügig höheren Temperaturen in flüssiger Form vorliegen. In der Forschung werden sie schon heute für die Schichtabscheidung elektrochemisch sehr unedler Metalle, insbesondere Aluminium, eingesetzt. Unedle Metalle lassen sich elektrochemisch nicht aus wässrigen Systemen abscheiden, da in diesem Falle lediglich eine Wasserzersetzung auftritt (Wasserstoffentwicklung).

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

Das Konzept besteht aus zwei fundamentalen Arbeitsschritten:

1. (Selektive) Extraktion der Metalloxide in ionischen Flüssigkeiten
2. (Selektive) galvanische kathodische Abscheidung der entsprechenden Metalle (+Silizium) plus anodischer Erzeugung von Sauerstoff


Für die Erreichung des Ziels – die Entwicklung eines Verfahrens für die Bedingungen des Mondes - müssen die wesentlichen Einflussparameter vor Ort bekannt sein. Insbesondere sind dies:

- Verringerte Gravitation
- Vakuum
- Keine Luftfeuchtigkeit

Die **verringerte Gravitation** (ca. 1/6 der Erdgravitation) spielt für elektrolytische Prozesse nur eine untergeordnete Rolle. Lediglich die Entwicklung gasförmigen Sauerstoffs kann beeinflusst werden, da das entstehende Gas langsamer an die Oberfläche steigt als auf der Erde.

Vakuum sowie die **fehlende Luftfeuchtigkeit** sind vorteilhaft für den lunaren Prozess: Ionische Flüssigkeiten besitzen einen vernachlässigbaren Dampfdruck und werden auch im Vakuum nicht verdampfen, so dass weder Materialverlust noch Verschmutzung der Umgebung zu befürchten ist. Darüber hinaus sind ionische Flüssigkeiten häufig sensitiv gegenüber Feuchtigkeit. Das bedeutet auf der Erde Sicherheitsvorkehrungen (z. B. trockenes Schutzgas), um Störungen zu vermeiden. Auf dem Mond sind die Sicherheitsvorkehrungen nicht notwendig, was eine große technologische Vereinfachung bedeutet, da weder Luftfeuchtigkeit durch das Fehlen einer Atmosphäre eine Rolle spielt und auch der Regolith nahezu wasserfrei ist.

Durch die Verwendung von Regolith-Simulat, d.h. künstlich hergestellten Materialien mit den Eigenschaften echten Regoliths, lassen sich die grundlegenden Forschungsarbeiten auf der Erde lösen. Für die Herstellung, Charakterisierung und Bereitstellung des Regolith-Simulat ist das Institut für Raumfahrtssysteme (IRAS) der TU Braunschweig (TUBS) bzw. das Fachgebiet Raumfahrttechnik (RFT) der TU Berlin (TUB) verantwortlich. Dafür stellte das RFT zwei Typen von Regolith-Simulate her. Beim ersten Typ handelt es sich um Simulate aus reinen Mineralien wie Anorthit, Ilmenit oder Olivin, welche in erheblichen Mengen im lunaren Regolith vorkommen. Diese wurden zu typischen Partikelgrößenverteilungen und Partikelformen aufbereitet. Mit Hilfe dieser Simulate war eine effektive Prozessentwicklung für das elektrochemische Verfahren möglich, da die Reaktionen eindeutig beschrieben werden können und unerwünschte Nebeneffekte durch weitere Bestandteile ausgeschlossen sind. Sobald der elektrochemische Prozess reproduzierbar funktionierte, wurde ein zunehmend komplexerer Simulat erzeugt, die unterschiedlichen mineralischen Bestandteile sowie die typischen auf dem Mond

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

vorkommenden thermisch beeinflussten Partikel wie Agglutinate und Gläser enthält. Mit Hilfe dieser Simulate wurde die selektive Lösung und Abscheidung von Metallen und Sauerstoff ohne vorherige Trennung der Bestandteile demonstriert. **Diese selektive Eigenschaft ist für die Verarbeitung komplexer Materialien wie lunarem Regolith erforderlich.**

Die chemischen (Extraktion aus dem Regolith) sowie elektrochemischen Arbeiten (Metallabscheidung plus paralleler Sauerstofferzeugung) wurden im Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST) durchgeführt. Die mittels des elektrochemischen Prozesses hergestellten Metalle sowie die verbleibenden Reststoffe wurden anschließend von IST und RFT untersucht. Die nach der Elementabscheidung verbliebenen Reststoffe sollten ebenfalls hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften untersucht werden, um einen Vergleich mit den Ausgangsstoffen zu ermöglichen und weitere Anwendungsmöglichkeiten abschätzen zu können. Dies können beispielsweise die Herstellung von Sinterbauteilen oder die Gewinnung weiterer Elemente durch Überführung in einen weiteren elektrochemischen Schritt sein. Aufgrund der geringen gewonnenen Menge an Material entfiel dieser Schritt.

Um die gewinnbaren Mengen an Material abzuschätzen, dienten zwei im Mondregolith häufig vorkommende Minerale als Beispiel:

- Aus 1kg Anorthit ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$) lassen sich 144g Calcium, 194g Aluminium, 202g Silicium und 461g Sauerstoff gewinnen.
- Aus 1kg Ilmenit (FeTiO_3) können 368g Eisen, 316g Titan und 316g Sauerstoff gewonnen werden.

Der Energiebedarf für diesen Prozess der Aluminiumgewinnung liegt bei ca. 7kWh/kg. Im Vergleich benötigen terrestrische Verfahren durch den vorgeschalteten Schmelzprozess 15kWh/kg Al.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Planung sowie der Ablauf des Forschungsprojektes und die Meilensteinplanung sind in Abbildung 1-1, sowie Abbildung 1-1 in den üblichen Diagrammen dargestellt.

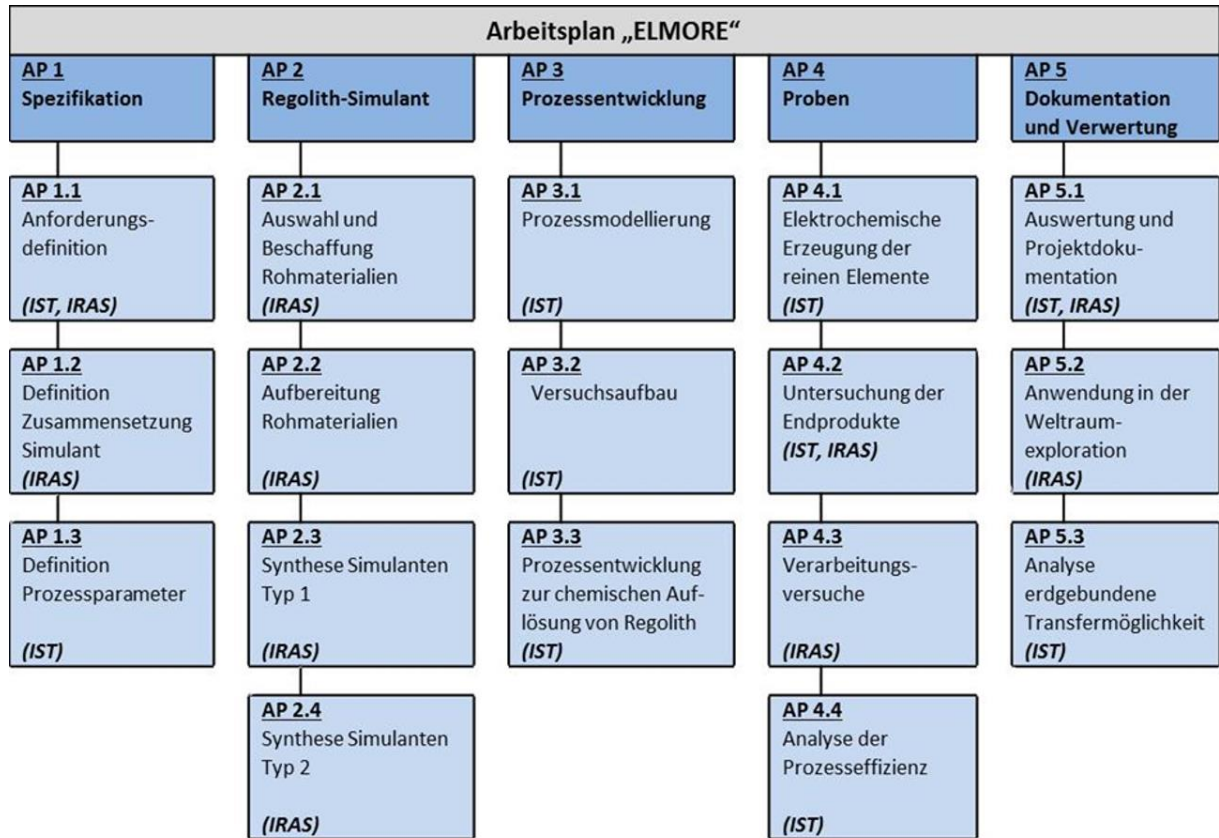


Abbildung 1-1: Arbeitspakete des ELMORE Projektes

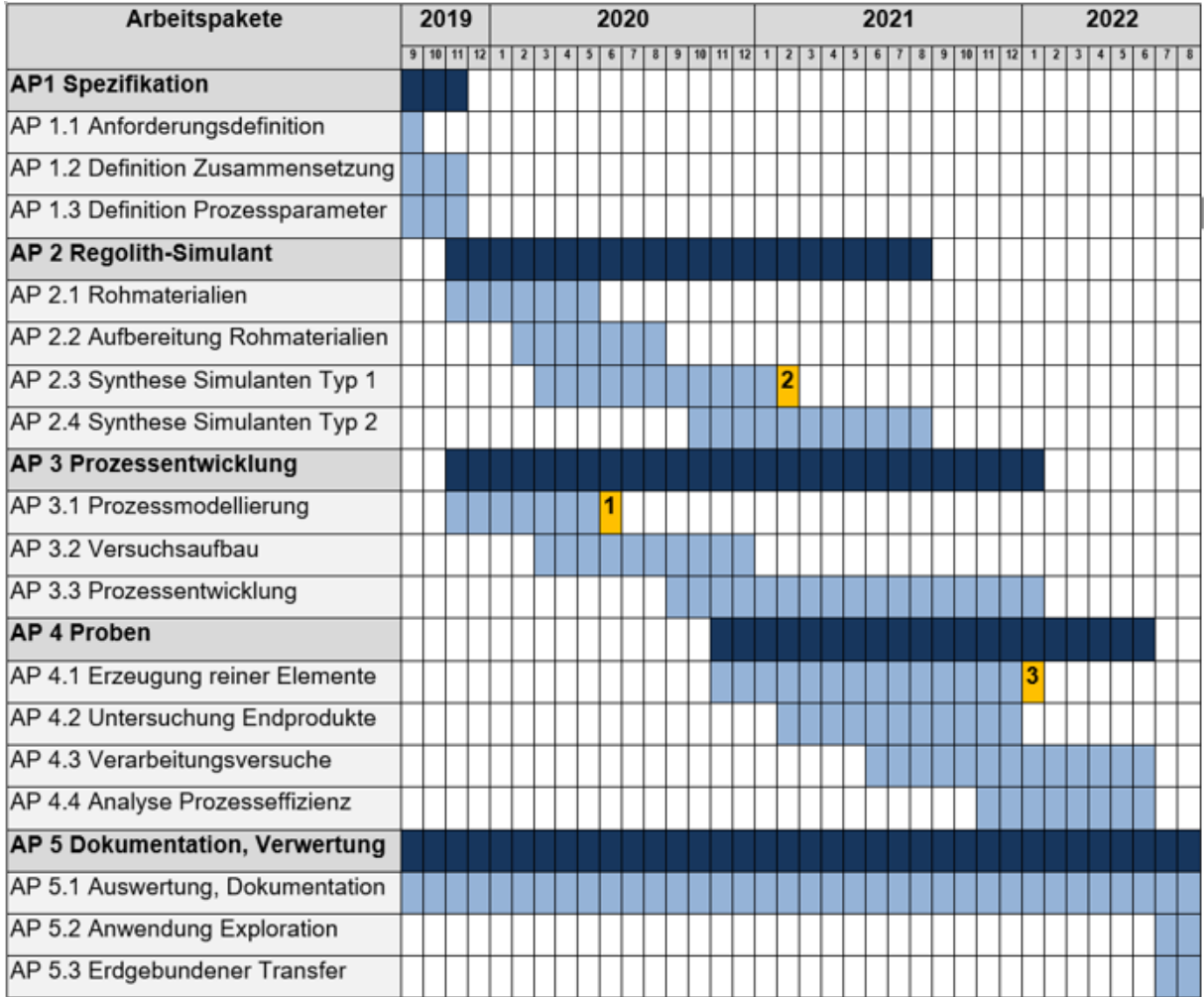



Abbildung 1-2: Zeitplan

Tabelle 1-1: Meilensteinplanung

Projekttreffen	Zeitpunkt	Erfolgskriterium	Abbruchkriterium
MS 1 Prozess	Monat 10	<ul style="list-style-type: none"> Prozessmodellierung erfolgreich abgeschlossen Rohmaterialien für Regolith-Simulanten beschafft 	<ul style="list-style-type: none"> Es konnte kein geeigneter Prozess für die Regolithverarbeitung definiert werden
MS 2 Simulant	Monat 18	<ul style="list-style-type: none"> Simulanten Typ 1 wurden synthetisiert Versuchsaufbau wurde abgeschlossen 	<ul style="list-style-type: none"> Synthese der nötigen Simulanten nicht möglich
MS 3 Elemente	Monat 29	<ul style="list-style-type: none"> Reine Elemente erzeugt Eigenschaften entsprechen den Erwartungen 	<ul style="list-style-type: none"> Abscheidung der Elemente aus ionischer Flüssigkeit erweist sich als nicht möglich
Abschlusstreffen	Monat 36	<ul style="list-style-type: none"> Projektabschluss und Ergebnispräsentation 	

Die Meilensteine wurden eingehalten.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

1.4.1 Angabe bekannter Lösungen, Verfahren und Schutzrechte: Regolithsimulat

Aufgrund des Mangels an echtem Mondregolith auf der Erde - die Apollo- und Luna-Missionen brachten nur ca. 360 kg Mondmaterial zur Erde - müssen für die Entwicklung von Verarbeitungstechnologien sogenannte Regolith-Simulate verwendet werden. Diese Simulate werden aus irdischen Gesteinen hergestellt und bilden je nach Anwendung die Eigenschaften des Mondregoliths in mehr oder weniger guter Qualität nach.


Seit den Tagen der Apollo-Missionen wurden weltweit mehrere Simulate entwickelt. Grundlage dafür waren die detaillierten Analyseergebnisse der zur Erde gebrachten Proben vom Mond. Diese Analysen zeigten eine große Ähnlichkeit zwischen dem Material vom Mond und einigen Gesteinsarten der Erde [1]. Dadurch ist es möglich, geeignete Rohstoffe auf der Erde in Bezug auf die Mondchemie und Mineralogie auszuwählen und so zu verarbeiten, dass die Partikelgrößenverteilung und Partikelmorphologie dem Mondregolith gleicht. Diese Arten von Simulate eignen sich gut für geotechnische Anwendungen und für Verarbeitungs- oder Handhabungsexperimente.

Bekannt ist der vom Johnson Space Center entwickelte Simulat JSC-1 und die später von Orbital Technologies Corporation für kommerzielle Zwecke hergestellten Varianten JSC-1A, -1AF und -1AC [2]. Bei diesen Simulaten handelt es sich um eine Variante aus Basaltgestein mit niedrigem Titangehalt.

MLS-1 oder Minnesota Lunar Simulat 1 ist eine Entwicklung der University of Minnesota. Er basiert auch auf Basalt als Rohstoff und wird für allgemeine Explorationszwecke genutzt [3]. Es wurden auch Varianten mit einem hohen Titangehalt (MLS-1P) oder Hochland-Eigenschaften (MLS-2) entwickelt [3].

In Japan wurde Fuji Japanese Simulat FJS-1 in drei Varianten von der Shimizu Corporation entwickelt. Die Rohstoffquelle ist Basalt vom Mt. Fuji in Japan [4]. Damit ist FJS-1 auch ein Mare-Typ-Simulat, und weist je nach Variante einen niedrigen oder hohen Titangehalt auf.

Chinesische Beispiele für Mare-Typ-Regolithsimulate sind CAS-1 und CLRS-1 (niedriger Titangehalt) und CLRS-2 (hoher Titangehalt) [5]. Ein Beispiel für eine Hochlandvariante ist NAO-1 [6], das hauptsächlich auf dem Mineral Anorthit basiert. Um den typischen Glasgehalt von Mondböden zu simulieren, wurde ein Teil des Anorthits durch Schmelzen und schnelles

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

Abkühlen modifiziert und zerkleinert, um amorphes Material mit der nötigen Partikelgröße zu erhalten.

In Europa wurde der EAC-1-Simulat vom European Astronaut Center in großen Mengen von mehreren hundert Tonnen entwickelt und produziert. Der Rohstoff ist ein Basaltgestein aus der Eifel und somit ein Mare-Type-Simulat [7]. Die großen Mengen werden für die im Bau befindliche LUNA-Anlage in Köln verwendet, die als Testumgebung für Mond-Explorationsexperimente dient, z.B. für die Rover-Entwicklung.

Mehrere andere Simulate wurden von verschiedenen Gruppen weltweit entwickelt, meist in kleinen Mengen und für spezifische Projekte und Anwendungen. Die meisten von ihnen repräsentieren eine Komposition vom Mare-Typ, nur wenige repräsentieren die anorthositischen Hochlandtypen oder gemischte (Intermediate) Zusammensetzungen. Lokalspezifische Simulate, wie sie aufgrund der Varianz in der Regolithzusammensetzung für spezifische Mondmissionen erforderlich sind, sind derzeit nicht verfügbar, was insbesondere für die Entwicklung von ISRU-Technologien von Nachteil ist. Ebenso sind von den genannten Simulate kaum Varianten kommerziell verfügbar oder es gibt keine ausreichende Beschreibung ihrer Zusammensetzung und der physikalischen Eigenschaften. Für ein Projekt wie ELMORE ist daher die Verwendung selbstentwickelter und gut charakterisierter Simulate und ihrer Teilbestandteile nötig.

1.4.2 Angabe bekannter Verfahren: Sauerstofferzeugung

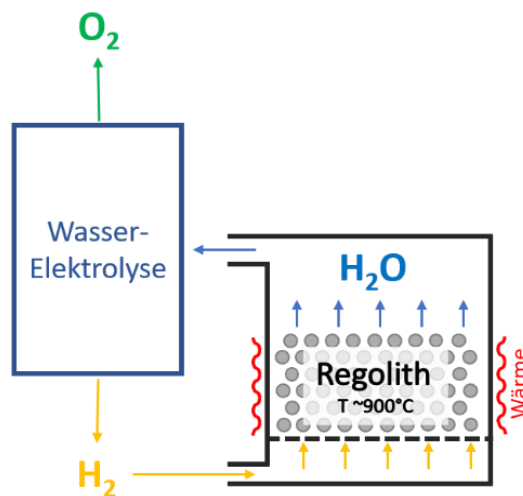


Abbildung 1-3: Reduktion von Regolith mit Wasserstoff

Abbildung 1-3 bis Abbildung 1-7 zeigen mögliche Verfahren, die für die lunare Sauerstoffgewinnung möglich sind. Allen Verfahren ist gemein, dass sie ausschließlich zur Sauerstoffgewinnung dienen und die Metallkomponente ungenutzt bleibt. Darüber hinaus arbeiten sie generell bei Temperaturen von über $900^\circ C$. Den höchsten TRL-Level hat das so genannte FFC-Verfahren erreicht, welches von der britischen Firma MetalYSIS in Zusammenarbeit mit der ESA

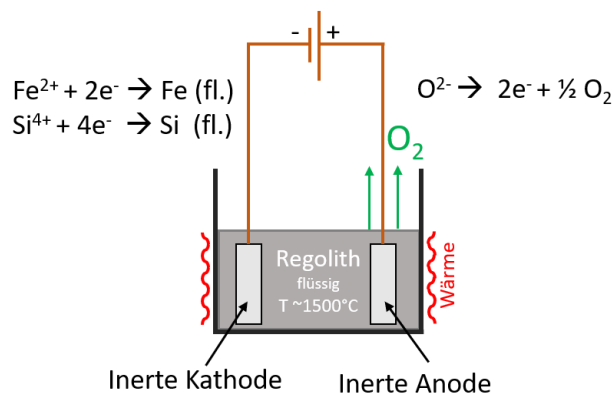


Abbildung 1-4: Galvanische Auftrennung von Regolith im schmelzflüssigen Zustand

entwickelt hat (FFC: Fray, Fathing, Chen)-Cambridge. Dieser Prozess wurde ursprünglich für die Titan-Produktion entwickelt und wurde für die Regolith-Bearbeitung modifiziert. Neben den hohen Temperaturen kämpfen die Forscher allerdings auch noch mit der Entwicklung von gasförmigem Chlor, welches in geringem Maße an der Anode entsteht und zu Stabilitätsproblemen der Elektrode führt (siehe Abbildung 1-6).

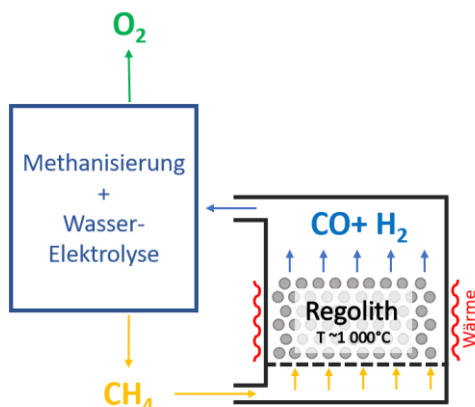


Abbildung 1-7: Reduktion von Regolith mit Methan

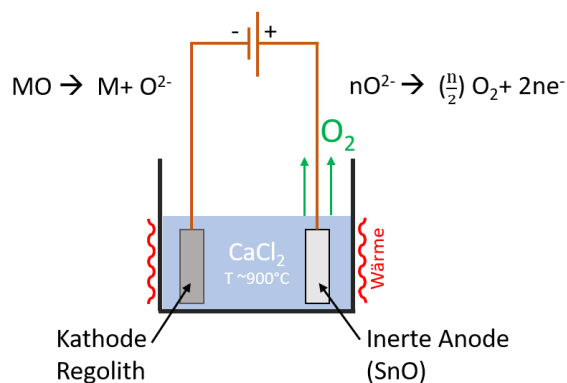


Abbildung 1-6: Aufschmelzen von Regolith mit Hilfe von Calciumchlorid und elektrochemischer Auftrennung (FFC-Process).

Ein weiteres Verfahren, welches von einem Konsortium um Airbus DS entwickelt wurde nennt sich ROXY (Regolith to OXYgen and Metals Conversion). Es ähnelt dem FFC-Cambridge-Process.

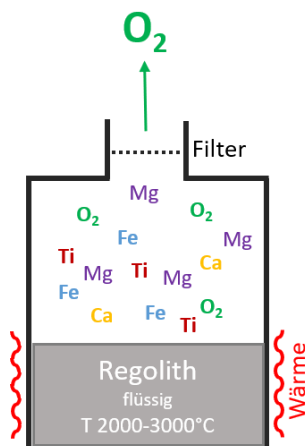



Abbildung 1-5: Vakuum Pyrolyse von Regolith

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

1.4.3 Angabe bekannter Verfahren: Metallerzeugung


Aktuelle erdgebundene Verfahren zur Metallgewinnung benötigen neben hochqualitativen Erzen eine permanente Versorgung mit weiteren Ressourcen, insbesondere Kohlenstoff. Dieser wird irreversibel zur Bindung des Sauerstoffs eingesetzt, wodurch große Mengen CO₂ entstehen. Insbesondere werden Stahl (thermochemisch) sowie Aluminium und Magnesium (elektrochemisch) auf diese Weise hergestellt.

Zwar wurden die CO₂-Emissionen für die Rohstahlerzeugung zwischen 1990 und 2016 um ca. 16 % gesenkt, liegen aber immer noch bei 1,34 t CO₂/t Stahlprodukt. Bei der Aluminiumerzeugung entstehen 0,7 t CO₂/t Aluminium. Dies wirkt sich auch wirtschaftlich aus, da nach dem Kyoto-Protokoll von 1997 die CO₂-Emission kostenpflichtig ist und über Zertifikate erworben werden müssen (EUA, European Union Allowances). Der Preis pro Tonne CO₂-Erzeugung liegt heute bei ca. 20 €.

Es existieren neue, ressourcensparende Verfahren zur Stahlerzeugung, die mit weniger CO₂-Emission auskommen (Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel), oder die das entstehende CO₂ wieder in Wertstoffe umwandeln (z. B. Thyssenkrupp mit dem Projekt „Carbon2Chem“). Grundsätzlich benötigen alle diese Prozesse aber neben dem Ausgangsstoff für die Metallerzeugung noch weitere Ressourcen.

Ein kombiniertes Verfahren zur Metall- und O₂-Gewinnung ist bis heute nicht bekannt. **Das innovative Ziel dieses Projektes war es daher, ein kombiniertes Verfahren zu entwickeln, welches mit komplexen Mineralgemischen ohne zusätzliche Ressourcen in einem geschlossenen System arbeitet.** Ein derartiges System hat vor dem beschriebenen wirtschaftlichen und ökologischen Hintergrund auch große kommerzielle Potentiale auf der Erde.

Für die Metallgewinnung auf dem Mond sind keine Prozesse bekannt. Die im Abschnitt 1.4.2 genannten Prozesse sind geeignet, Metalle zu gewinnen, allerdings sind keine Versuche dazu bekannt. Es wurden einige Methoden diskutiert, beispielsweise die Abscheidung von Titan aus Ilmenit (FeTiO₃), allerdings benötigen diese Verfahren reine Ausgangsstoffe oder große Mengen an Verbrauchsmaterialien. Reine Stoffe sind auf dem Mond aufgrund der intensiven Mischvorgänge bei der Regolithentstehung nicht zu finden. Des Weiteren würde die Notwendigkeit für Verbrauchsmaterialien den Vorteil des verringerten Transportbedarfes von der Erde wieder aufheben.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01


Elektrochemische Arbeiten zur Abscheidung von Metallen aus ionischen Flüssigkeiten sind seit einiger Zeit bekannt. Einen umfassenden Überblick geben insbesondere F. Endres [8] und Kollegen sowie H. Ohno [9]. Die Auflösung von Metalloxiden wird beschrieben von N. Poulimenou [10]. Hintergrund ist die Aufbereitung von Bauxiterzen zur Gewinnung von Aluminium. A. Abbott [11] beschäftigt sich mit der chemischen Auflösung von Oxiden in ionischen Flüssigkeiten zur Aufbereitung von Stäuben, die im Lichtbogenverfahren zur Stahlherstellung entstehen. B. Shvartsev [12] untersucht die Löslichkeit von SiO_2 in IL. Alle Oxide finden sich auch in Regolith wieder.

1.4.4 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Die verwendete Literatur findet sich am Ende des Abschlussberichtes. Im Fraunhofer IST wurden für die Literaturrecherche die FhG-Datenbank eLiB verwendet. Für Patentrecherchen wurde die öffentliche Patentdatenbank DEPATISnet des Deutschen Patent- und Markenamtes verwendet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Rolle des Projektpartners TUB/RFT wurde schon im Kapitel 1.2 erklärt. Hilfestellung bei der chemischen Auflösung des Regoliths kam von D. Dingwell von der TU München.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

2 Eingehende Darstellung

Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse der Arbeiten aller Projektpartner beschrieben. Verantwortlichkeiten der Projektpartner in den einzelnen Arbeitspaketen werden genannt.

2.1 AP1/1-3 Spezifikation

Anforderungsdefinition (IST/RFT)


In AP 1.1 wurden von beiden Projektpartnern gemeinsam die wichtigsten Anforderungen an den Prozess definiert. Die Anforderungen ergeben sich aus den Eigenschaften des Regoliths sowie den grundlegenden Randbedingungen des ELMORE-Prozesses.

Definition der Zusammensetzung der Simulate (RFT)

Auf Basis der Ergebnisse von AP 1.1 wurde am RFT im Rahmen von AP 1.2 die geeigneten Zusammensetzungen der Simulate definiert. Hierbei wurden insbesondere solche Regolitypen als Vorbild gewählt, welche auf dem Mond an besonders vielen Stellen vorkommen. Außerdem wurden Mineralarten identifiziert, die an einigen Stellen des Mondes in höherer Konzentration vorkommen und für die Elementextraktion besonders geeignet sind. Diese Mineralien lassen sich mit geeigneten Verfahren separieren und stünden dem ELMORE-Prozess damit auch auf dem Mond in hoher Reinheit zur Verfügung. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht klar war, ob sich die Elementextraktion mit einem komplexen, aus vielen verschiedenen Bestandteilen bestehenden Regolith möglich ist, der Regolith einer Vorbehandlung bedarf oder nur einzelne seiner Bestandteile verarbeitet werden können, wurden diese Mineralien von Anfang an untersucht.

Definition der Prozessparameter (IST)

Aufgrund der in AP 1.1 definierten Anforderungen lassen sich die Prozessparameter definieren. Grundlage sind zum Beispiel die Auswahl der elektrochemisch abzuscheidenden Metalle, die eine Auswirkung auf die Auswahl der Regolithsimulate sowie der ionischen Flüssigkeiten haben. Ebenso werden dadurch die Prozesstemperatur, elektrische Spannung und die Stromdichte beeinflusst.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

2.2 AP2.1 Auswahl und Beschaffung der Rohmaterialien (RFT)

In AP 2.1 wurden die für die Entwicklung und Herstellung der Simulate benötigten Rohmaterialien ausgewählt und beschafft. Dafür sind Bestandteile wie Ilmenit, Olivin, Pyroxene oder Gläser, Impaktite und Agglutinate nötig. Diese Bestandteile enthalten zum einen die benötigten Metalle in hohen Anteilen, zum anderen unterscheiden sie sich bezüglich ihres chemischen Aufbaus, was die Lösungseigenschaften beeinflusst. Daher war es wichtig, diese Bestandteile in reiner Form vorliegen zu haben, um den Prozess daran zu testen und zu verstehen, bevor komplexere Gemische genutzt werden. Die Beschaffung dieser Materialien wurde abgeschlossen, siehe Abbildung 2-1 und dem IST bereitgestellt. Neben der Nutzung bereits am IRAS vorrätiger Rohmaterialien wurden einige kommerziell erhältliche Mineralien beschafft, beispielsweise Ilmenit. Außerdem erfolgte die Gewinnung von Rohmaterialien in Steinbrüchen der Eifel (basische Vulkanaschen und SiO₂-arme Mineralien aus vulkanischen Auswurflogen) sowie im Nördlinger Ries (glasreiche Impaktgesteine und thermisch alterierte Bestandteile).




Abbildung 2-1: Olivinknollen aus dem Meerfelder Maar der Eifel

Die Beschaffung der Materialien im Nördlinger Ries erfolgte mit Unterstützung von Wissenschaftlern des RiesKraterMuseums vor Ort, die die entsprechenden Aufschlüsse kennen und über die nötigen Betretungserlaubnisse verfügen.

2.3 AP2.2 Aufbereitung der Rohmaterialien (RFT)

In AP 2.2 wurden die in AP 2.1 beschafften Rohmaterialien aufbereitet, so dass sie für die Herstellung der Simulate bereit sind. Bei Materialien, welche direkt in Steinbrüchen gewonnen wurden, erfolgt dies durch Reinigung und Trocknung, gefolgt von einer chemischen und mineralogischen Charakterisierung. Die ursprünglich geplante Abscheidung ungewünschter Nebenbestandteile sowie die Herstellung reiner Mineralphasen mittels magnetischer Separation

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

konnte, wegen des Betrugsfalls nicht erhaltenen magnetischen Separators, nicht durchgeführt werden. Dies erforderte eine Anpassung der Arbeiten in AP 2 in folgenden Punkten:


- Die Trennungsprozesse wurden auch an reinen Oxiden (Al_2O_3 , TiO_2 , ...) durchgeführt, aus denen die typischen Mineralphasen des Regolith aufgebaut sind. Die Arbeit mit diesen reinen Oxiden hat den Vorteil, dass sich die elektrochemischen Prozesse detaillierter verstehen lassen. Die benötigten Oxide wurden kommerziell beschafft, so dass hierfür der Einsatz einer magnetischen Separation nicht nötig ist.
- Ein weiterer Ansatz basierte auf der Nutzung von Gläsern als Zwischenprodukt, siehe Abbildung 2-2: Glas hergestellt aus TUBS-T zur Herstellung von amorphen Strukturen. Hierfür wurden die Regolithsimulate zu Gläsern aufgeschmolzen und anschließend zerkleinert. Dies hatte den Vorteil, dass die Materialien in amorpher Form vorlagen und nicht in ihrer ursprünglichen kristallinen Form. Amorphe Strukturen sollten sich im Vergleich zu kristallinen Partikeln deutlich einfacher elektrochemisch aufspalten zu lassen, wodurch die Prozesse effizienter ab-



Abbildung 2-2: Glas hergestellt aus TUBS-T zur Herstellung von amorphen Strukturen.

laufen sollten. Dies konnte jedoch nicht in Versuchen verifiziert werden.

- Einzelne darüber hinaus noch erforderliche Mineralphasen wurden in reiner Form beschafft (kommerziell, als Probe oder direkt in entsprechenden Aufschlüssen gewonnen), siehe Abbildung 2-3. Bei Bedarf kann eine magnetische Separation von bestimmten Mineralphasen durch Forschungsinstitute im Bereich Geologie erfolgen, welche über einen magnetischen Separator verfügen. Da das RFT mit entsprechenden Instituten kooperiert und die benötigten Mengen gering sind, sind hiermit keine zusätzlichen Kosten verbunden.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

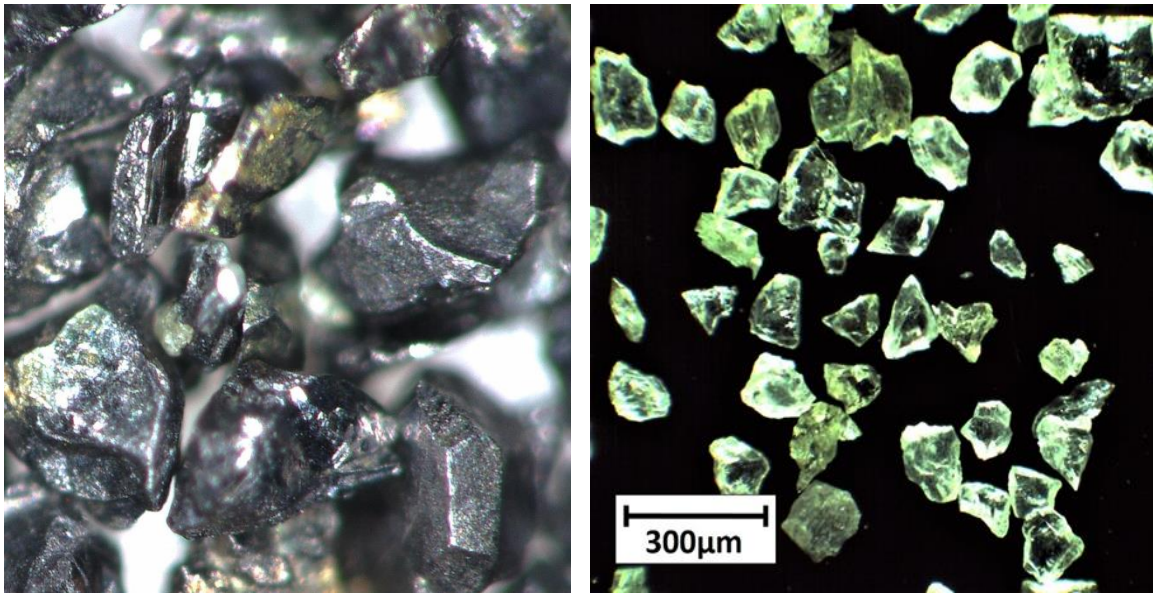


Abbildung 2-3: Aufbereiteter Ilmenit (links) und Chrysolit (rechts).


Als Ergebnis der Arbeiten in AP 2.2 stehen Al_2O_3 , TiO , FeO und Fe_2O_3 als reine Oxide, Plagioklas, Olivin und TUBS-T/M als amorphe Strukturen und Plagioklas und Olivin als reine Mineralien mit ausreichender Reinheit und Charakterisierung für die weiteren Arbeitspakete (2.3 und 2.4) bereit.

2.4 AP2.3 Synthese Simulat Typ 1 (RFT)

In AP 2.3 wurden erste Simulate hergestellt und an das IST geliefert. Bei diesen handelte es sich um Simulate aus reinen Mineralien wie Anorthit, Ilmenit oder Olivin, welche in erheblichen Mengen im lunaren Regolith vorkommen. Diese wurden zu typischen Partikelgrößenverteilungen und Partikelformen aufbereitet. Außerdem wurde ein Verfahren zur Herstellung von Glas aus Simulat und reinen Mineralien entwickelt. Solche Gläser kommen in einigen Regionen des Mondes in hohen Anteilen vor (bis zu 50%, üblich sind 10-30%), daher stellen sie eine wichtige mögliche Quelle für Rohstoffe dar. Gläser wurden außerdem für den unter AP 2.2 beschriebenen angepassten Projektplan benötigt. Die hergestellten Gläser wurde wie auch die übrigen Materialien hinsichtlich ihrer Partikelgrößenverteilung und Partikelform aufbereitet und ans IST geliefert.

2.5 AP2.4 Synthese Simulat Typ 2 (RFT)

In AP 2.4 wurden komplexe Simulate aus den einzelnen Bestandteilen erzeugt. In diesem Arbeitspaket wurde die für das Projekt benötigte Menge der Simulate TUBS-M und TUBS-T hergestellt und an das IST geliefert. Bei diesen handelt es sich um lithische Simulate aus rein kristallinen Bestandteilen. Darüber hinaus wurden kleinere Mengen weiterer Simulate

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

hergestellt, die mit den Mineralien Ilmenit und Olivin angereichert waren sowie Varianten, die auch die thermisch alterierten Bestandteile Glas und Agglutinat enthielten. Letztere Varianten entsprechen sehr exakt der komplexen Zusammensetzung des echten lunaren Regoliths. Weitere Simulatarten wurden entwickelt und können in ihrer Zusammensetzung an die Anforderungen des IST angepasst hergestellt werden. Die in diesem AP geplante Anreicherung von bestimmten Bestandteilen zur Verbesserung der Metallgewinnung wurde durch die bei AP 2.2 beschriebenen Maßnahmen ersetzt, so dass keine inhaltlichen Änderungen im Vergleich zum ursprünglichen Projektplan nötig sind.

2.6 AP3.1 Prozessmodellierung (IST)

In diesem Arbeitspaket wurden die geeigneten IL zum chemischen Auflösen des Regoliths sowie zur elektrochemischen Abscheidung der Elemente evaluiert. Kriterien waren die chemische Eignung, technische Handhabbarkeit und ggfs. schon wirtschaftliche Aspekte.

2.7 AP3.2 Versuchsaufbau (IST)

Dieses AP umfasste die Entwicklung von Laboraufbauten für die chemische Auflösung des Regoliths sowie für die elektrochemische Abscheidung der gelösten Spezies. Grundlage dabei war der Ausschluss von Luftfeuchtigkeit, der zur Zersetzung der ionischen Flüssigkeiten führen kann. Grundlage für beide Verfahren war der Einsatz von Schutzgasen, im Idealfall die Verwendung von getrockneter Luft.

Die Versuche zur chemischen Auflösung von Regolith sowie der elektrochemischen Abscheidung von Metallen und Sauerstoff aus den ionischen Flüssigkeiten fanden überwiegend in Schutzgasatmosphäre in einer Glovebox statt (siehe Abbildung 2-4).



Abbildung 2-4: N₂-gefüllte Glovebox, Luftfeuchtigkeit < 0.1%



Abbildung 2-5: Elektrochemische Zelle

Die elektrochemische Zelle (Abbildung 2-5) wurde bewusst klein dimensioniert. Das hängt einerseits mit den Kosten für die ionischen Flüssigkeiten zusammen, die die Menge limitieren, auf der anderen Seite aber auch mit der Notwendigkeit, eine Möglichkeit zum Heizen der Elektrolyten innerhalb der Glovebox zu schaffen.

2.8 AP3.3 Prozessentwicklung zur chemischen Auflösung von Regolith (IST)

Hier wurde die praktische Vorgehensweise der chemischen Auflösung des Regoliths untersucht. Kriterien sind Ausschluss von Luftfeuchtigkeit sowie die Handhabbarkeit mit Blick auf spätere technische Verwendung. Dazu kommen die in AP 3.1 evaluierten IL zum Einsatz. Neben den unterschiedlichen Regolith-Simulaten wurden auch Untersuchungen über die Löslichkeit der reinen Oxide, so wie sie im Regolith vermutet wurden, durchgeführt (Tabelle 2-1).

IL	MO and Regolith	Results
DMSO ₂ : AlCl ₃	Al ₂ O ₃	No dissolution
[EMIm]Cl	Al ₂ O ₃	No dissolution
[EMIm]BF ₄	Al ₂ O ₃	No dissolution
[EMIm]HSO ₄	Al ₂ O ₃	No dissolution
"	Fe ₃ O ₄	Dissolved at high temperature
"	TUBS-M	No dissolution
"	TUBS-T	No dissolution
"	Olivin	No dissolution
"	Ilmenit	No dissolution
[EMIm]HSO ₄ + H ₂ O	TUBS-M	XRF peak for Fe
[EMIm]HSO ₄ + H ₂ O	TUMS-T	XRF peak for Fe
[EMIm]HSO ₄ _ 210 oC	Amr. TUMS-M	XRF peak for Fe with other impurities
[EMIm]HSO ₄ _ 210 oC	Amr. TUMS-T	XRF peak for Fe with other impurities
EG : Ch.Cl. (2:1 mole)	Fe ₃ O ₄	Dissolution and deposition
"	Fe ₂ O ₃	No dissolution
"	FeO	No dissolution
"	TUBS-M	No dissolution
"	TUBS-T	No dissolution
"	Ilmenit	No dissolution
"	Olivin	No dissolution
EG : Ch.Cl. (2:1 mole) + aq. H ₃ PO ₄	TUBS-M	XRF, peak for Fe
MA : Ch.Cl. (1:1 mole)	Fe ₃ O ₄	Dissolution, XRF, Fe peak
"	Fe ₂ O ₃	No dissolution
"	FeO	dissolved
"	TUBS-M	No dissolution
"	TUBS-T	No dissolution
"	Ilmenit	No dissolution
"	Olivin	No dissolution
DBU + MTU (2:1 mol)	α-Al ₂ O ₃	No dissolution
DBU + MTU (2:1 mole)	γ-Al ₂ O ₃ (50-100 nm)	Turbid solution
SBMI	Amr. TUBS-M	No dissolution
SBMI	Amr. TUBS-T	No dissolution
Conc. HCl (37%)	Hyd. Al ₂ O ₃	white ppt, then dissolved in pure water

Tabelle 2-1: Übersicht über die verwendeten IL und die Löslichkeit der R-Simulate und der reinen Oxide

Aus der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Suche nach geeigneten IL zur chemischen Auflösung der Simulate eine Herausforderung bleiben wird. Tatsächlich ließ sich lediglich in [EMIm]HSO₄ + dist. water (3:1) der Eisenanteil aus Regolith-Simulat TUBS-M mittels XRF-Methode nachweisen (Abbildung 2-6). Eine elektrochemische Abscheidung aus dem Elektrolyten war nicht möglich.

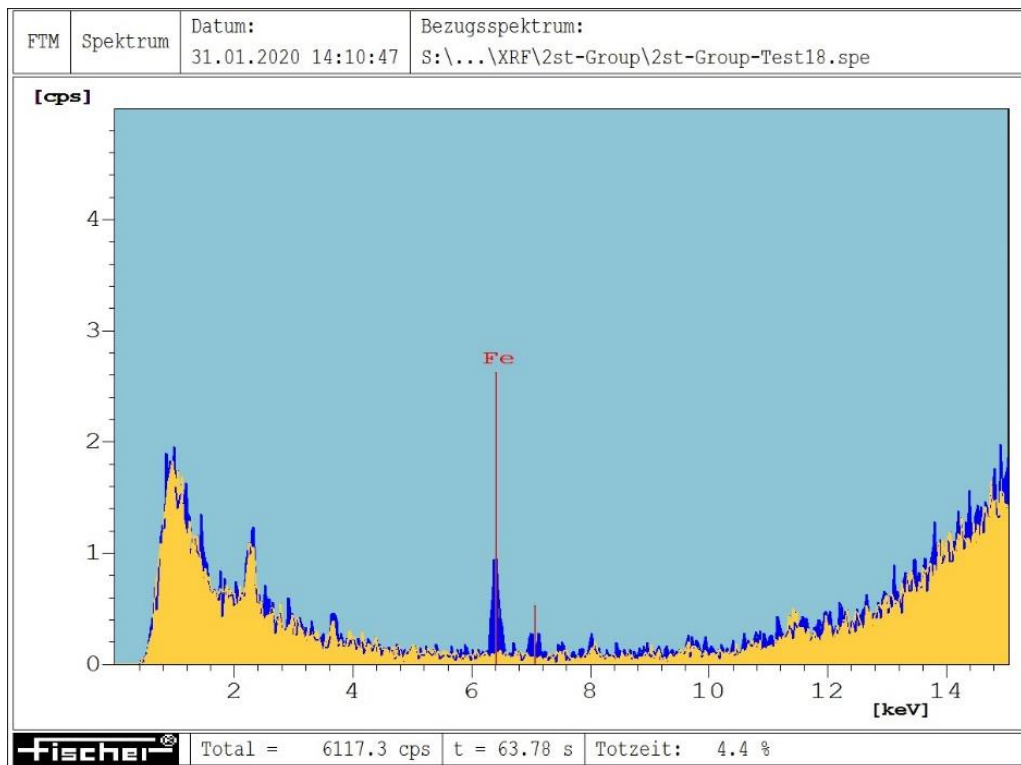
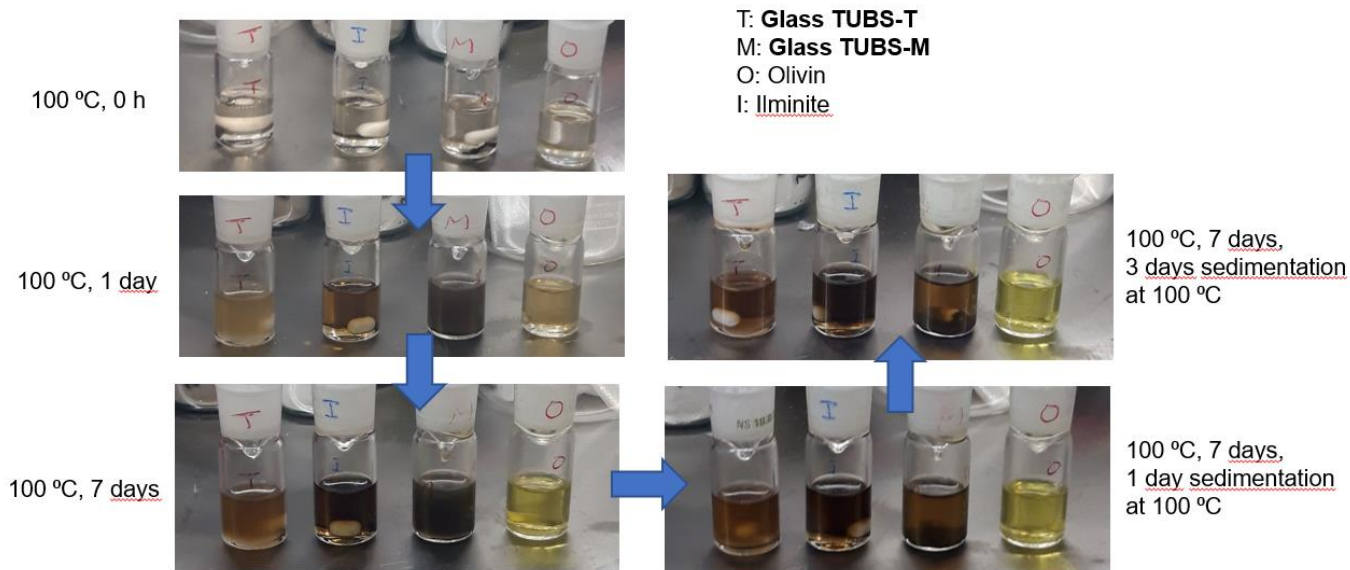


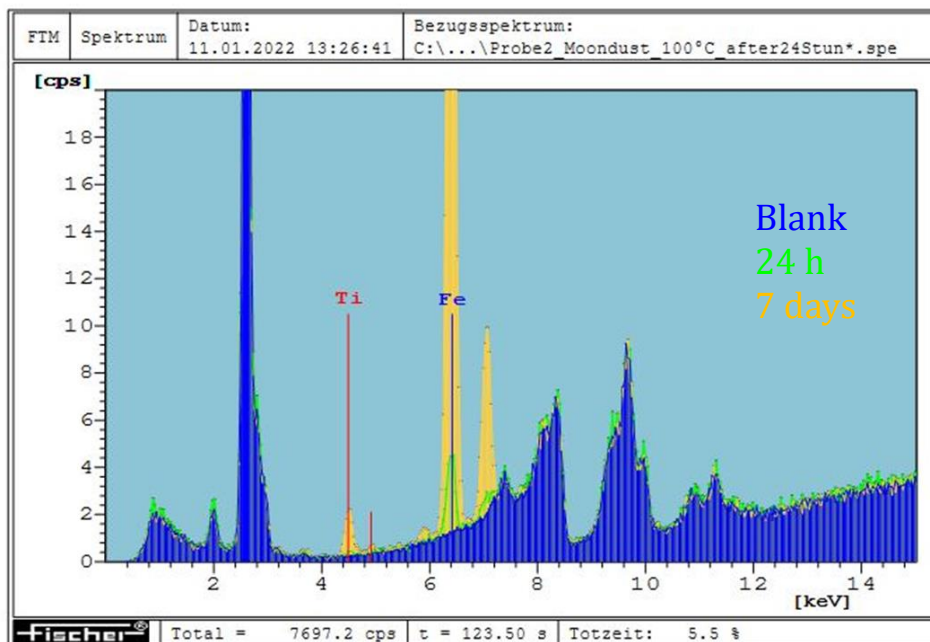
Abbildung 2-6: Charakteristische Fe-Peaks als Ergebnis der Regolith-Auflösung

Teilweise Abhilfe konnten Variationen der IL schaffen. So genannte IL-Trichloride gelten als sehr aggressiv mit einem höheren Lösungsvermögen. Bei den Trichloriden handelt es sich um handelsübliche IL, die im Nachgang mit gasförmigem Chlor behandelt wurden und daraus das Anion $[Cl_3]^-$ bilden [18, 19]. Diese Verbindungen wurden von der Fa Iolitec hergestellt und erwiesen sich als extrem kostenintensiv. Aus Abbildung 2-7 wird deutlich, wie die Zeitspanne ist: Der Lösungsprozess lässt sich aufgrund der Farbveränderung verfolgen und geht über 7 Tage bei einer Temperatur von 100°C ohne komplette Auflösung. Abbildung 2-8 zeigt die XRF-Analyse des teilweise gelösten Regoliths in Trill. Dennoch zeichnet sich ein Erfolg ab, wie im nachfolgenden Kapitel deutlich wird.



- Verschiedene Farben für verschiedene Simu. Regolith
- Die Farbe wird mit der Zeit dunkler, da sich mehr Regolith auflöst.


Abbildung 2-7: Auflösung von verschiedener Regolithsimulate in ionischer Trichloridflüssigkeit in GB



Messparameter Bezugsspektrum:
Hochspannung = 50 kV (875) Prim. Filter = Ni 10
Kollimator 2 = 0.60 Dm. Anodenstrom 1000 uA
Messdistanz = 1.13 mm
FastC = 7661.06, SlowC = 7240.96

Spektrrenliste:
█ Bezug: C:\...\Probe2_Moondust_100°C_after24Stun*.spe
█ C:\...\Raw Data Spektrum\Blak_15122021.spe
█ C:\...\Probe2_extraMoondust_100°C_after7*.spe

Abbildung 2-8: XRF-Analyse des teilweise gelösten Regoliths TUBS-M in TrilL

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

2.9 AP4.1/AP4.2 Elektrochemische Erzeugung der reinen Elemente und Untersuchung der Endprodukte (IST)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die AP 4.1 und 4.2 zusammengefasst. In diesen beiden Arbeitspaketen wurde untersucht, mit welchem Prozess die kathodische Metallabscheidung sowie die anodische Sauerstoffabscheidung optimal funktioniert. Kriterien sind dabei wirtschaftliche Parameter (Stromausbeute) sowie die technische Handhabbarkeit. Nach der elektrochemischen Abscheidung werden die so gewonnenen Metalle untersucht.

In Vorversuchen erwiesen sich so genannte solvatisierte IL als teilweise geeignet: Solvatisierte IL sind relativ einfache organische Verbindungen, die erst im Zusammenspiel mit weiteren speziellen Salzen die Eigenschaften von IL ausbilden. Bekannte Beispiele sind Dimethylsulfon, DMSO₂, oder auch Cholinchlorid.

In einer Mischung von Cholinchlorid und Ethylenglykol ließ sich reines Eisenoxid, Fe₃O₄, auflösen. Aus diesem (jetzt) Elektrolyten ließ sich durch Anlegen einer elektrischen Spannung reines Eisen auf einer Kupferplatte abscheiden. Die anodische Sauerstoffentwicklung wurde nicht untersucht. Abbildung 2-9 zeigt rechts ein photographisches Bild der Eisenschicht, links eine rasterelektronische Aufnahme. Die EDX-Analyse zur quantitativen Bestimmung ist in Abbildung 2-10 zu sehen.

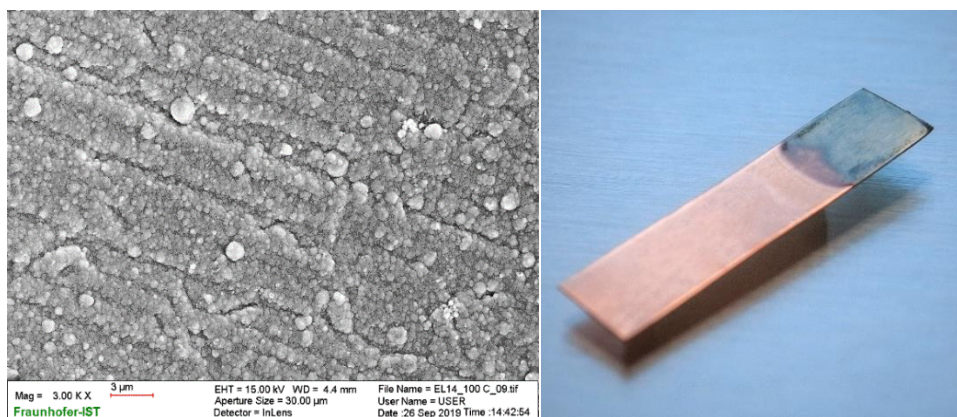


Abbildung 2-9: Metallisches Eisen galvanisch auf einer Kupferplatte abgeschieden

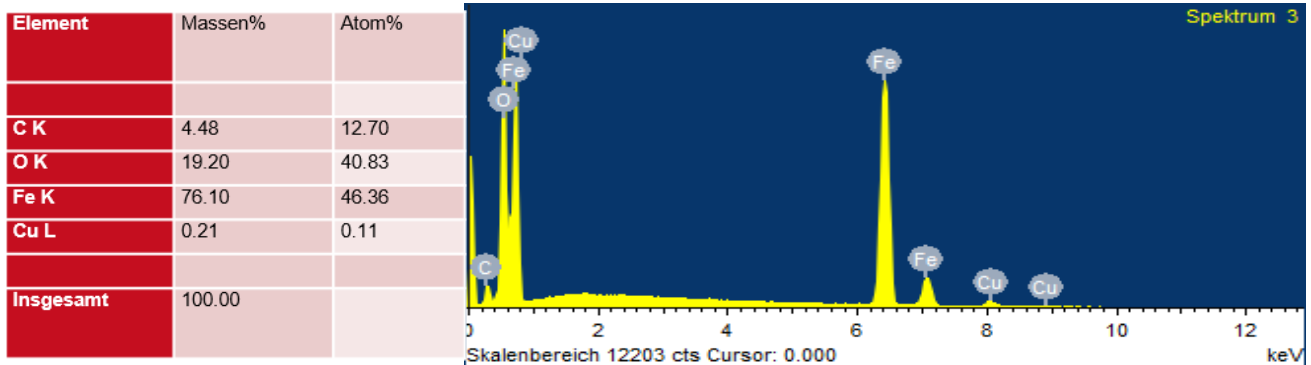


Abbildung 2-10: EDX-Analyse der abgeschiedenen Eisenschicht auf Kupfer

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Auflösung von Regolith TUBS-M in TriCl beschrieben. Aus diesem Elektrolyten wurde jetzt versucht, durch Anlegen einer elektrischen Spannung metallisches Eisen auf einer Kupferplatte abzuscheiden. Allerdings war die Viskosität des Elektrolyten auch bei $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ sehr hoch, sodass eine galvanische Abscheidung direkt aus dem Elektrolyten nicht möglich war. Hohe Viskosität behindert den Stofftransport der gelösten Ionen. Erst nach Zugabe von Wasser war die Viskosität soweit reduziert, dass die Metallabscheidung möglich wurde. Abbildung 2-11 zeigt die Metallabscheidung mit Elektrodenbestückung und EDX-Analyse der Metallschicht.



Electrolyte: TriCl IL + TUBS-M mit Wasser verdünnt, um die Viskosität zu verringern
Electrodes:
WE: Cu
CE and RE: Platinierte Ti Drähte

Element	Massen%	Atom%
C K	4.67	16.98
O K	4.10	11.20
Al K	0.37	0.60
Si K	0.38	0.58
Ti K	3.02	2.76
Fe K	81.90	64.06
Cu L	5.55	3.82
Insgesamt	100.00	

Abbildung 2-11: Fe-Abscheidung aus aufgelöstem Regolith: Links: metallisches Eisen auf Kupfer, Mitte: Elektroden und Elektrolyte, Rechts: EDX Analyse der Metallschicht

2.10 AP4.3 Verarbeitungsversuche (RFT)

Da erst zum Ende des Jahres 2021 Metall abgeschieden werden konnte, wurden vorher bereits am RFT die notwendigen Vorbereitungen getroffen, um metallurgische (Schliffbilder) und werkstofftechnische (Dichte, Härte, Zugfestigkeit) Untersuchungen und andere Verarbeitungsversuche durchzuführen, sobald ausreichend Material bereitsteht. Diese Vorbereitungen wurden abgeschlossen. Die dafür notwendige Materialmenge (ca. 400 g) wurde jedoch nicht mehr

bis zum Ende des Projektes abgeschieden, wo durch keine weiteren Untersuchungen möglich waren.

Außerdem wurden in diesem AP die Schritte untersucht werden, die nötig sind, um die Metalle für eine Verarbeitung im Gussverfahren sowie in der additiven Verarbeitung nutzbar zu machen. Zur praktischen Betrachtung dieser Aspekte werden jedoch noch größere Mengen Material (über 1 kg) benötigt.



Abbildung 2-12: Zugprobe zur Ermittlung der Streckgrenze. Gefertigt durch Guss in gesinterter Regolithform und spanend nachbearbeitet.

Da sich dies im Laufe des Projekts als unrealistisch herausgestellt hat, wurde Aluminium anderen Ursprungs verwendet, um damit Gießversuche vorzubereiten und durchzuführen. Eine Zugprobe ist in Abbildung 2-12 dargestellt. Die Versuche basieren auf der Verwendung von Gussformen aus Regolith im gepressten oder gesinterten Zustand. Die gegossenen Teile wur-

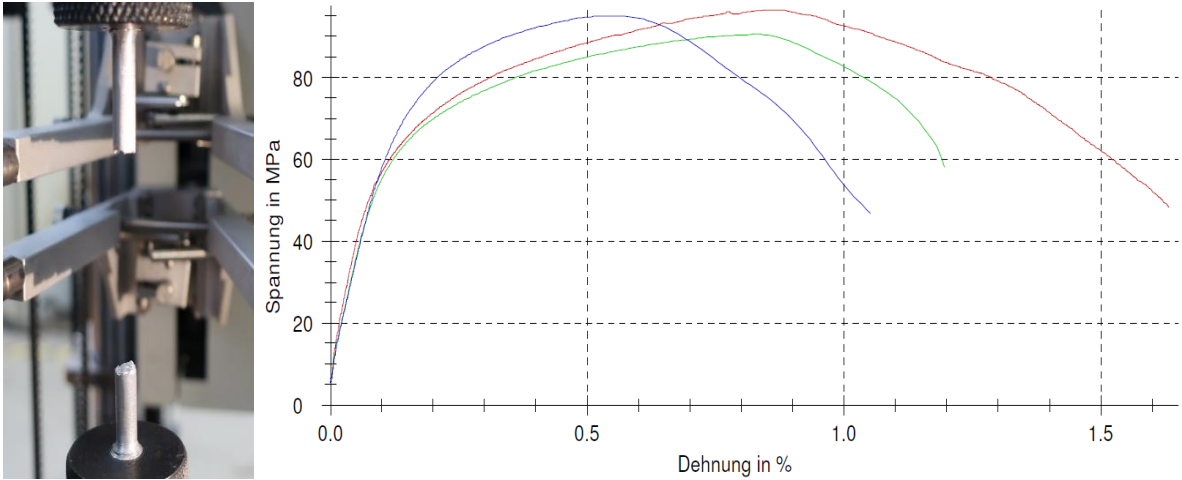



Abbildung 2-13: Zugversuch und ermittelte Festigkeitswerte anhand des Spannungs-Dehnungsverlaufs.

den zur Ermittlung der Zugfestigkeit und Härte verwendet. Mit diesen Untersuchungen wurden Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten der später aus dem ELMORE Prozess

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

gewonnenen Ressourcen getroffen werden können. Es konnte keine signifikante Abweichung der Materialkennwerte gefunden werden, so dass dies als eine geeignete Verarbeitungsmethode der Produkte des ELMORE-Prozesses mit den vorhandenen lunaren Ressourcen identifiziert werden konnte. Abbildung

2.11 AP4.4 Analyse der Prozesseffizienz (IST)

Nach Abschluss der praktischen Arbeiten wurde über eine detaillierte Analyse der Ergebnisse der effektivste Prozess evaluiert. Neben den reinen wirtschaftlichen Daten wie Kosten für Elektrolyten, Stromausbeuten und Energieeinsatz wurde auch die Übertragbarkeit für lunare Anwendungen, aber auch der Transfer für weitere terrestrische Anwendungen, berücksichtigt. Im Ergebnis wird deutlich, dass aufgrund der schlechten Löslichkeit von Regolith in IL lediglich ein begrenztes Prozessfenster zur Verfügung steht. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

2.12 AP5/1-3

Auswertung und Projektdokumentation (IST, RFT)

Die Organisation und Koordination des Projekts und der Projektplanung wurde begleitend über den gesamten Projektzeitraum durchgeführt. Im Rahmen dieses AP wurden Projekttreffen wie Kick-Off, Zwischentreffen und Telefonate zur Abstimmung der Arbeiten durchgeführt sowie die Projektdokumentation erstellt.

Anwendung in der Weltraumexploration (RFT)

Das RFT hat in diesem AP die Anwendungsmöglichkeiten des ELMORE-Prozesses für den Weltraum untersucht. Dabei wird aufgrund der vorläufigen Bewertung des erreichten Prozesses ein hohes Potential für die Raumfahrt erwartet. Es bietet ein hohes Potential zur Bereitstellung von Werkstoffen und Sauerstoff vor Ort und damit auch ein hohes Potential zur Reduktion der Transportkosten von Ressource von der Erde. Die erreichte Prozessausbeute in Bezug auf abgeschiedene Masse und Anzahl verschiedener Elemente erlauben zu diesem Zeitpunkt noch keine quantitative Einordnung des Potentials.

Analyse erdgebundener Transfermöglichkeiten (IST)

In diesem Arbeitspaket wurden Prozesse untersucht, die sich terrestrisch einsetzen lassen, z. B. Metallgewinnung, Metallrecycling, Batterieherstellung etc. Weitere Details sind in Kapitel 2.15 erläutert.

2.13 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.13.1 Kostennachweis RFT

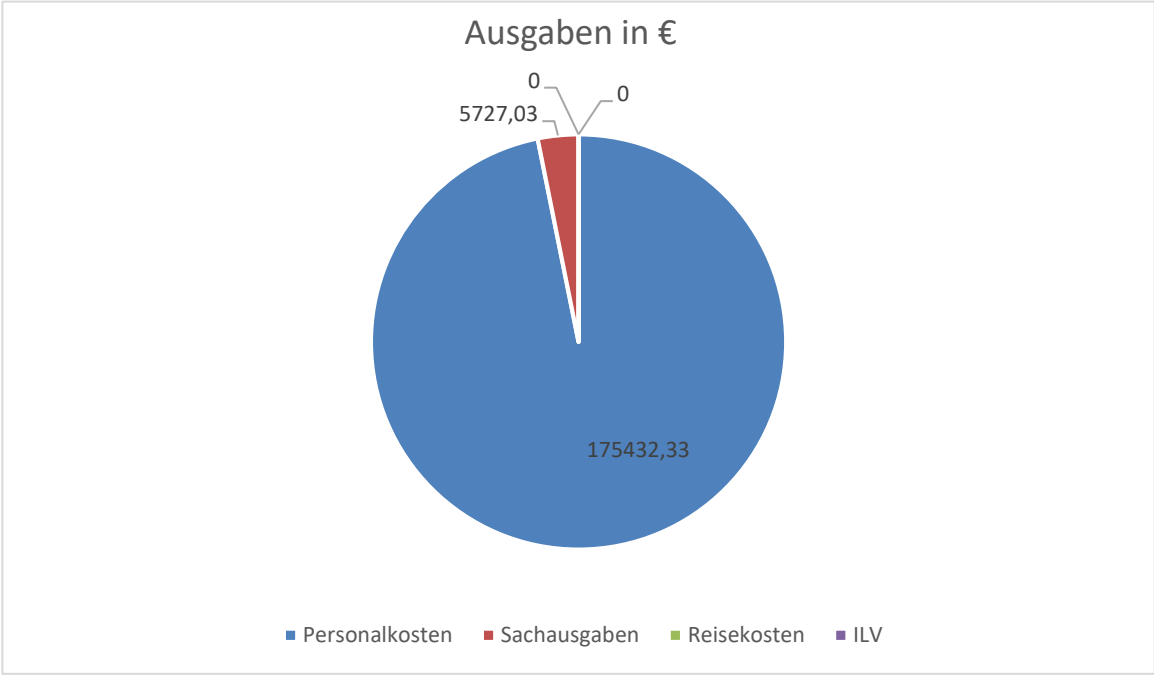


Abbildung 2-14: Mittelnutzung am IRAS/RFT im Projekt

Der Bedarf an den geplanten Reisekosten ist durch die Reisebegrenzungen während der Pandemie entfallen.

Tabelle 2-2: Aufteilung der Kostenarten des zahlenmäßigen Nachweises bei IRAS/RFT

Kostenarten bei IRA/RFT (Vorläufig)	Betrag
Personalkosten	175.432 €
Reisekosten	0 €
Sachausgaben	5.727 €
Summe	181.159 €

2.13.2 Kostennachweis IST

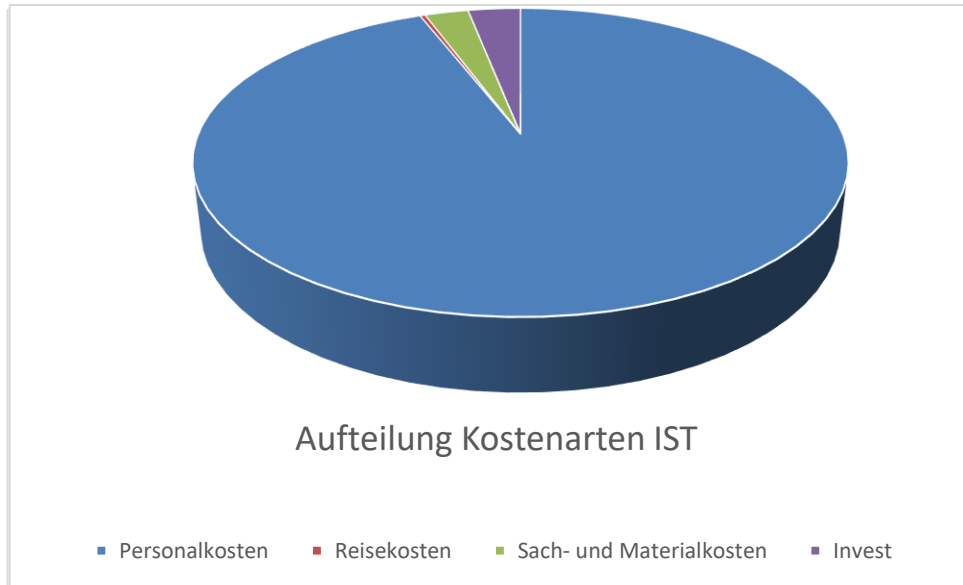



Abbildung 2-15: Aufteilung der Kostenarten des zahlenmäßigen Nachweises bei IST

Tabelle 2-3: Aufteilung der Kostenarten des zahlenmäßigen Nachweises bei IST

Kostenarten bei IST	Betrag
Personalkosten	288.373,94
Reisekosten	941,83
Materialkosten	7.857,75
Invest	9.453,80
Summe	306.627,32

2.14 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Fraunhofer IST und am Fachgebiet für Raumfahrttechnik durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen zur Bearbeitung des Projektes.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

2.15 Voraussichtlicher Nutzen


Der voraussichtliche Nutzen des Verfahrens ist vielfältig. Da sich die elektrochemische Auftrennung von Mineralien nicht nur auf die Nutzung zur Erschließung des Mondes bzw. in ferner Zukunft auf anderen Himmelskörpern eignet, sondern auch auf der Erde eingesetzt werden kann.

In der Raumfahrtstrategie ist der Mond das nächste Ziel der Forschung, und dient als Basis zur Entwicklung neuer Technologien und als Ausgangspunkt für Deep Space Missionen sowie die Entwicklung von Space Mining. Die Frage der Ressourcenquellen für diesen neuen Abschnitt der Raumfahrt ist noch ungeklärt, Tatsache ist jedoch, dass die meisten Ressourcen direkt vom Mond kommen müssen. Dazu müssen auch die Verfahren für ihre Herstellung entwickelt werden, wozu ELMORE einen wichtigen Beitrag liefert.

Die Notwendigkeit, ressourcenschonend mit Energie und Material umzugehen, bietet auch auf der Erde einmalige Chancen. ELMORE ermöglicht die CO₂-arme Herstellung bestimmter Metalle wie Eisen, Aluminium oder Kupfer und kann somit einen bedeutenden Anteil zur CO₂-Reduktion leisten. Darüber hinaus wird erwartet, dass auch der Energiebedarf bedeutend geringer ausfallen wird (keine Erzschnmelzen mehr nötig). Die Weiterentwicklung der arbeiten mit ionischen Flüssigkeiten führen direkt zur elektrochemischen Reduktion vom Treibhausgas CO₂ zu organischen Wertstoffen wie Methan oder Methanol, die zu chemischen Produkten weiterverarbeitet werden können. Somit leistet dieses Projekt neben einer innovativen Technologie zur Materialgewinnung auf dem Mond auch einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung auf der Erde. Darüber hinaus zeichnet sich ab, dass sich der Einsatz von IL ebenfalls beim Recycling Seltener Erden sowie bei der Produktion neuer Li-Batterietypen einsetzen lässt.

2.16 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt

Während der Durchführung des Projektes sind keine neuen Verfahren mit ähnlichen Eigenschaften bzw. Produkten bekannt geworden.

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

2.17 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

ESA: Space resources workshop, Luxemburg, 2019

Electrowinning of metals and oxygen from moon regolith, A. Dietz, E. Moustafa

4. – 6. März 2020: Nationales Statusseminar „Forschung unter Weltraumbedingungen“

des DLR: A. Dietz et al.: Geschlossene Elektrochemische Prozesse zur Gewinnung reiner Elemente aus MOndREgolith

VDI: Veröffentlichung in VDI-Nachrichten, 14.4.2020: „Staubige Angelegenheit: Mondgestein als Quelle neuer Rohstoffe“; <https://www.vdi.de/news/detail/staubige-angelegenheit-mondgestein-als-quelle-neuer-rohstoffe>

4.2.2021: Airbus-ROXY Investigator Workshop mit nationaler und internationaler Beteiligung (TU Eindhoven, Boston University)


Space Tech Expo Bremen, 2022

Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Allianz „Space“: Ausstellung des ELMORE-Prozesses

Internationale Luftfahrtausstellung Berlin 2022


Gemeinschaftsstand der Fraunhofer Allianz „Space“: Ausstellung des ELMORE-Prozesses

ESA Space Resources week 2023, Luxemburg: Poster: Electrowinning of metals from lunar regolith by using new types of ionic liquids, A. Dietz¹, E. Moustafa,


	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

3 Verwendete Literatur

- [1] G. Heiken, D. Vaniman, B. M. French, Lunar Sourcebook – A User`s Guide to the Moon, Cambridge University Press, Cambridge, 1991
- [2] D. S. McKay, J. L. Carter, W. W. Boles, C. C. Allen, J. H. Allton, JSC-1: A new Lunar Soil Simulant, Engineering, Construction, and Operations in Space IV, American Society of Civil Engineers, (1994) 857-866
- [3] L. A. Taylor, Status of Lunar Regolith Simulants – an Update, Lunar Exploration Analysis Group, 2015
- [4] T. Matsushima, J. Katagiri, K. Uesugi, A. Tsuchiyama, T. Nakano, 3D Shape Characterization and Image-Based DEM Simulation of the Lunar Soil Simulant FJS-1, Journal of Aerospace Engineering, Volume 22 Issue 1, 2009
- [5] L. A. Taylor, C. M. Pieters, D. Britt, Evaluations of lunar regolith simulants, Planetary and Space Science (2016) 1-7
- [6] Y. Li, J. Liu, Z. Yue, NAO-1: Lunar Highland Soil Simulant Developed in China, Journal of Aerospace Engineering, 2009
- [7] K. Manick, S-J. Gill, J. Najorka, C. L. Smith, L. Duvet, Fundamental Properties Characterization of Lunar Regolith Simulants at the European Space Agency (ESA) Sample Analogue Curation Facility, 49th Lunar and Planetary Science Conference 2018
- [8] F. Endres, A. Abbott, D. MacFarlane (Ed.) – Electrodeposition from ionic liquids, Wiley-VCH 2008
- [9] H. Ohno (Ed.) – Electrochemical aspects of ionic liquids, Wiley-Interscience 2005
- [10] N. Poulimenou - Preliminary investigation of ionic liquids utilization in primary aluminum production, Proceedings of the International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering, Prague, Czech Republic, August 11-12, 2014, Paper No.60, 60-1
- [11] A. Abbott - Processing Metal Oxides Using Ionic Liquids, SUMEEPnet, 19th March 2008, Henry Ford College Loughborough
- [12] B. Shvartsev, D. Gelman, D. Starosvetsky, Y. Ein-Eli - Silicon Oxide Dissolution in Fluorohydrogenates Ionic Liquid, Journal of The Electrochemical Society, 163 (5) E135-E141 (2016) E13
- [13] S. Linke, L. Windisch, N. Kueter, A. Voss, P. Prziwara, M. Grasshoff, E. Stoll, C. Schilde, A. Kwade; TUBS-M and TUBS-T – new lunar regolith simulants adaptable to local surface characteristics IAC-18-A3.2C.5, 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany (2018)

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

- [14] N. Gerdes, L. G. Fokken, S. Linke, S. Kaierle, O. Suttman, J. Hermsdorf, E. Stoll, C. Trentlage; Selective Laser Melting for processing of regolith in support of a lunar base, *Journal of Laser Applications* 30, 032018 (2018)
- [15] A. Voß, R. Freund, S. Harms, S. Linke, E. Stoll; MIRA3D – a terrestrial robotic prototype for additive layer manufacturing of lunar regolith, IAC-18-A3.2B.11,x43642, 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany (2018)
- [16] Qinggong Zhu, Jun Ma, Xinchun Kang, Xiaofu Sun, Huizhen Liu, Jiayin Hu, Zhimin Liu, and Buxing Han; *Angew. Chem. Int. Ed.* 2016, 55, 9012 –9016
- [17] C. Breuermann, Bundeszentrale für politische Bildung, „Von Menschen gemacht – Der anthropogene Treibhauseffekt“, Internet: <https://www.bpb.de/gesellschaft/umwelt/klimawandel/38441/anthropogener-treibhauseffekt>
- [18] X. Li, Z. Li, K. Binnemans, Closed-loop process for recovery of metals from NdFeB magnets using a trichloride ionic liquid; *Separation and Purification Technology* 275 (2021) 119158
- [19] A. V. d. Bossche, N. R. Rodriguez, S. Riaño, W. Dehaen, K. Binnemans, Dissolution behavior of precious metals and selective palladium leaching from spent automotive catalysts by trihalide ionic liquids, *RSC Adv.*, 2021, 11, 10110
- [20] G. Heiken, D. Vaniman, B. M. French; *Lunar Sourcebook – A User’s Guide to the Moon*, Cambridge University Press, Cambridge (1991)
- [21] A. V. d. Bossche, N. R. Rodriguez, S. Riaño, W. Dehaen, K. Binnemans, Dissolution behavior of precious metals and selective palladium leaching from spent automotive catalysts by trihalide ionic liquids, *RSC Adv.*, 2021, 11, 10110
- [22] B.L. Jolliff, M.A. Wieczorek, C.K. Shearer, C.R. Neal; *New Views of the Moon*, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, vol. 60 (2006)
- [23] K.R. Sacksteder, B. Gerald; In-situ resource utilization for lunar and mars exploration, *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition*, AIAA 2007-345 (2007)
- [24] *The Global Exploration Roadmap*, International Space Exploration Coordination Group (ISECG), National Aeronautics and Space Administration Headquarters, NP-2018-01-2502-HQ (2018)
- [25] L. Sibille, P. Carpenter, R. Schlagheck, R. A. French; *Lunar Regolith Simulant Materials; Recommendations for Standardization, Production and Usage*, NASA/TP-2006-214606 (2006)
- [26] H. Benaroya, M. Ettourney; Framework for evaluation of lunar base structural concepts, *Journal of Aerospace Engineering* 5 (2), 187-198 (1992)
- [27] W.K. Hartmann, R.J. Phillips, G.J. Taylor; *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute (1986)

	Abschlussbericht ELMORE Förderkennzeichen: 50WM1966	Dok-Nr.:
		Datum: 07.08.2023
		Verfasser: A. Dietz
		Version.: 01

- [28]S. Linke, L. Windisch, N. Kueter, J.E. Wanvik, A. Voss, E. Stoll, C. Schilde, A. Kwade; TUBS-M and TUBS-T based modular Regolith Simulant System for the support of lunar ISRU activities, Planetary and Space Science, Vol. 180 (2020)
- [29]G.D. Bart, R.D. Nickerson, M.T. Lawder, H.J. Melosh; Global survey of lunar regolith depths from LROC images, ICARUS 215, 485-490 (2011)
- [30]S.R. Taylor, M.D. Norman, T. Esat; The lunar highland crust: The origin of the Mg suite, Meteoritics 28:448 (1993)
- [31]W.A. Deer, R.A. Howie, J. Zussman; An Introduction to the Rock-Forming Minerals, Longmans, Green and Co. Ltd, London (1967)
- [32]U. Sebastian; Gesteinskunde, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2018)
- [33]R.V. Morris; In situ reworking (gardening) of the lunar surface: evidence from the Apollo cores, Proceedings Lunar and Planetary Conference 9: 1801-1811 (1978)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart: Abschlussbericht
3a. Titel des Berichts: ELMORE - Geschlossene Elektrochemische Prozesse zur Gewinnung reiner Elemente aus Mondregolith	
3b. Titel der Publikation: --	
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Dietz, Andreas	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2022
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)): --	6. Veröffentlichungsdatum: --
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse): Fraunhofer IST, Riedenkamp 2, 38108 Braunschweig TU Berlin	7. Form der Publikation: --
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Ber.Nr. Durchführende Institution: Abschlussbericht Fraunhofer IST 10. Förderkennzeichen: 11a. Seitenzahl Bericht 11b. Seitenzahl Publikation: 12. Literaturangaben: -- 14. Tabellen: 15. Abbildungen:
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung: Der vorliegende Abschlussbericht stellt die wesentlichen Ergebnisse des Projektes ELMORE „Geschlossene Elektrochemische Prozesse zur Gewinnung reiner Elemente aus Mondregolith “ dar. In dem Projekt wurde untersucht, wie sich aus Mond-Regolith-Simulat durch chemische und elektrochemische Prozesse reine Metalle gewinnen lassen. Die Veredelung von Regolith ist wichtig für den Aufbau der Infrastruktur eines Habitats auf dem Mond. Die dazu benötigten Materialien können nur bedingt von der Erde zum Mond transportiert werden. Grundlagen der Untersuchungen waren die chemische Auflösung des Regoliths durch ionische Flüssigkeiten sowie die elektrochemische Abscheidung der gelösten Salze – ebenfalls in ionischen Flüssigkeiten – zu Metallen und Sauerstoff. Das Regolith wurde dazu thermisch und mechanisch vorbereitet.	
19. Schlagwörter: Regolith - Simulat, ionische Flüssigkeiten, Elektrochemie, Ilmenit	
20. Verlag : --	21. Preis : --

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report: Final Report
3a. Report Title:	
3b. Title of Publication:--	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)): Dietz, Andreas	5. End of Project 31.07.2020
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)): --	6. Publication Date: --
8. Performing Organization(s) (Name, Address): Fraunhofer IST, Riedenkamp 2, 38108 Braunschweig TU Berlin	7. Form of Publication: -- 31.07.2020
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. Königswinterer Str. 522-524 53227 Bonn	9. Originator's Report No: Abschlussbericht Fraunhofer IST 10. Reference No.: 11a. No. of Pages Report: 11b. No. of Pages Publication: -- 12. No. of References 14. No. of Tables: 15. No. of Figures:
16. Supplementary Notes	
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract : This final report presents the main results of the ELMORE project "Closed Electrochemical Processes for the Extraction of Pure Elements from Lunar Regolith". The project investigated how pure metals can be extracted from lunar regolith simulant through chemical and electrochemical processes. The refinement of regolith is important for building the infrastructure of a habitat on the moon. The materials needed for this can only be transported from Earth to the Moon to a limited extent. The investigations were based on the chemical dissolution of the regolith by ionic liquids and the electrochemical separation of the dissolved salts - also in ionic liquids - to metals and oxygen. The regolith was prepared thermally and mechanically for this purpose.	
19. Keywords: Regolith simulate, ionic liquids, electrochemistry, Ilmenite,	
20. Publisher: --	21. Price: --