

Mai 2018

# Studie zum ökologischen Vergleich der Produktion von Phosphorsäure aus Klärschlammasche mittels Phos4life-Verfahren mit der Primärproduktion von P-Säure aus Rohphosphat

## Endbericht

### Kontaktpersonen:

Jonas Mehr  
Prof. Stefanie Hellweg  
ETH Zürich  
Institut für Umweltingenieurwissenschaften  
Gruppe Ökologisches Systemdesign  
John-von-Neumann-Weg 9  
CH- 8093 Zürich  
Tel: +41 44 633 4337  
Email: [stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch](mailto:stefanie.hellweg@ifu.baug.ethz.ch)

# Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Summary .....	5
1. Ziel und Untersuchungsrahmen .....	7
2. Sachbilanz.....	10
2.1 Primärproduktion .....	10
2.2 P4L-Verfahren .....	12
3. Wirkungsabschätzung.....	14
4. Interpretation und Diskussion.....	18
4.1 Diskussion der Referenzszenarien.....	18
4.1.1 Primärproduktion .....	18
4.1.1 P4L-Verfahren.....	19
4.2 Sensitivitätsanalyse.....	21
4.2.1 Sensitivität <i>ökonomische Allokation</i> und <i>cut-off</i> .....	25
4.2.2 Sensitivität Laugungsrückstand- und Gipsverwertung .....	28
4.3 Einbettung in den Gesamtkontext.....	29
4.4 Schlussfolgerungen.....	31
5. Referenzen.....	32
Anhang.....	34

## Zusammenfassung

Im Kanton Zürich wurde im Jahr 2015 mit der Eröffnung der neuen zentralen Klärschlamm (KS)-Verwertungsanlage im Klärwerk Werdhölzli die Grundlage für das Phosphor (P)-Recycling für den ganzen KS im Kanton geschaffen. Im Moment wird durch die Stiftung ZAR in Zusammenarbeit mit dem Technologieunternehmen Técnicas Reunidas im Auftrag des Kanton Zürich ein Verfahren entwickelt, um aus KS-Asche P-Säure zu produzieren: das Phos4Life (P4L)-Verfahren. Damit kann P-Säure aus der Primärproduktion (aus Rohphosphat) substituiert werden.

Die vergleichende Ökobilanz dieser Studie hat das Ziel, die Umweltwirkungen von primär hergestellter P-Säure und sekundär – mittels P4L-Verfahren – hergestellter P-Säure zu quantifizieren und zu vergleichen. Darüber hinaus sollen Umwelt-Hotspots sowie Sensitivitäten für beide Produktionspfade identifiziert werden. Als Wirkungsabschätzungsmethoden für die Abschätzung der Umweltwirkungen wurden für diesen Vergleich die Methode der ökologischen Knappheit (UBP), IPCC 2013 GWP 100a, USEtox (sowohl Öko- als auch Humantoxizität), die CE<sub>x</sub>D-Methode (Mineralien) sowie ReCiPe Endpoint (H) gewählt. Die Systemgrenzen umfassen bei beiden Produktionsarten die gesamte Produktionskette inklusive Nebenprodukt- und Rückstandsverwertungen bzw. -entsorgungen. Die funktionelle Einheit der Ökobilanz beträgt 1 kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (100%).

Die Resultate zeigen für alle Wirkungsindikatoren einen deutlichen ökologischen Vorteil des P4L-Prozesses im Vergleich zur Primärproduktion (UBP: -23'491 UBP/kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ReCiPe: -0.48 Pt./kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Für das P4L-Verfahren entsteht durch Gutschriften der im Prozess produzierten Nebenprodukte für alle Wirkungsindikatoren ein Netto-Umweltnutzen (UBP: -2'899 UBP/kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ReCiPe: -0.15 Pt./kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; negative Werte bedeuten eingesparte Umweltwirkungen). Die Primärproduktion zieht hingegen beträchtliche Umweltwirkungen nach sich (UBP: 20'593 UBP/kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, ReCiPe: 0.32 Pt./kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), hauptsächlich durch die Rückstände (verunreinigter P-Gips, schwermetallhaltige P-Säure aus Reinigung), welche zu einem grossen Teil auf direktem Weg in die Umwelt gelangen.

Um Unsicherheiten der Verwertung bzw. dem Absatz der Nebenprodukte und Rückstände zu berücksichtigen sowie mögliche Fortschritte in der Umweltgesetzgebung der Primärproduktion einzubeziehen, wurde in einer Sensitivitätsanalyse für die Primärproduktion ein Best-Case- und für das P4L-Verfahren ein Worst-Case-Szenario erstellt. Auch in diesem Vergleich liegen die Umweltwirkungen des P4L-Verfahrens für fünf der sechs Wirkungsabschätzungsmethoden tiefer, lediglich bei der ReCiPe-Methode resultieren im Vergleich zur Primärproduktion höhere Umweltwirkungen (+0.18 Pt./kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Somit ist sekundär produzierte P-Säure selbst unter ungünstigen Bedingungen ökologisch vorteilhaft im Vergleich zu primärer P-Säure.

Die Analyse zeigt, dass das P4L-Verfahren – unter der Bedingung, dass (i) die Vorgaben der Schweizer Gesetzgebung eingehalten werden, (ii) sekundäre Produkte (insbesondere P-Säure und Eisen(III)chloridlösung) abgesetzt und (iii) Rückstände verwertet werden, sowie (iv) die Wärme von der KVA bezogen werden kann – trotz der beträchtlichen Betriebsmittelaufwände ökologisch vorteilhaft betrieben werden kann. Der weitere Verlauf der Pilotversuche wird in Bezug auf Nebenprodukt- und Rückstandqualitäten und somit über deren Verwertungswege allenfalls zusätzliche Erkenntnisse liefern.

## Summary

In 2015, the new centralized sewage sludge incineration facility at the wastewater treatment plant Werdhölzli was put into operation. The new facility establishes a basis for phosphorus (P) recycling for the canton of Zurich. On behalf of the latter, the ZAR foundation in cooperation with the Spanish technology company Técnicas Reunidas is developing a process producing P acid from sewage sludge ash: the Phos4Life (P4L) process. The P4L process enables the substitution of primary P acid produced from phosphate rock.

A comparative life cycle assessment (LCA) was performed to quantify and compare the environmental impact of primary and secondary – produced by the P4L process – P acid. Furthermore, the goal is to identify environmental hot spots and sensitivities for both production processes. The following life cycle impact assessment (LCIA) methods were chosen for the LCA: Method of Ecological Scarcity (UBP), IPCC 2013 GWP 100a, USEtox (both eco and human toxicity), cumulative exergy demand (minerals) as well as ReCiPe Endpoint (H). For both production processes, the system boundaries include the entire production chain as well as the recovery of by-products and the disposal of residues. The functional unit of the LCA is 1 kg of  $H_3PO_4$  (100%).

The results demonstrate a clear ecological benefit for the P4L process compared to the primary production for all LCIA methods (UBP: -23'491 UBP/kg  $H_3PO_4$ , ReCiPe: -0.48 Pt./kg  $H_3PO_4$ ). Credits associated with co-produced by-products (iron chloride), on the one hand, allow for an overall ecological net benefit of the P4L process regarding all LCIA methods (UBP: -2'899 UBP/kg  $H_3PO_4$ , ReCiPe: -0.15 Pt./kg  $H_3PO_4$ ; negative values are equivalent to saved impacts). The primary production of P acid, on the other hand, causes significant environmental impacts (UBP: 20'593 UBP/kg  $H_3PO_4$ , ReCiPe: 0.32 Pt./kg  $H_3PO_4$ ), mainly due to residues (contaminated P gypsum, heavy-metal-containing raffinate acid of the P acid purification step) which, to a large extent, end up directly in the environment.

Uncertainties arise from the distribution and disposal of by-products and residues as well as possible prospective improvements with regard to the environmental legislation of primary production. In a sensitivity analysis, a best-case scenario for the primary production and a worst-case scenario for the P4L process were created. The sensitivity analysis reveals that the environmental impact of the P4L process is smaller with regard to all LCIA methods, except for the ReCiPe method. Using different allocation methods in another sensitivity analysis, we obtain a similar picture, with the P4L process performing superior in comparison to the primary production for all categories for the cut-off allocation approach. With regard to economic allocation, the P4L process was better in terms of UBP, climate change, human toxicity and cumulative exergy demand, but not ecotoxicity and ReCiPe. Hence, secondary P acid tends to be ecologically beneficial even under unfavourable conditions.

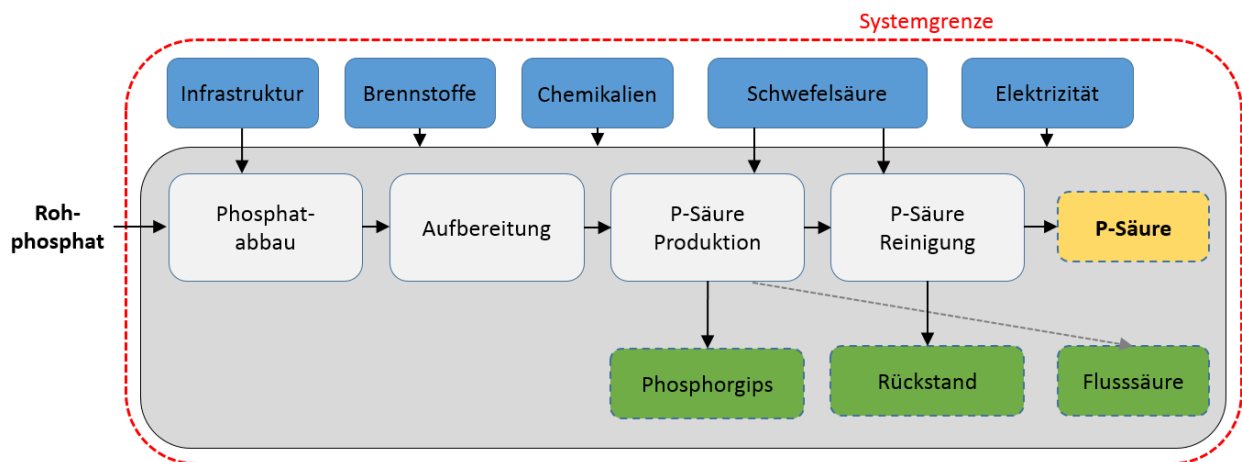
The analysis shows that the P4L process can – given that (i) the legal requirements of the Swiss law are complied with, (ii) secondary products (in particular P acid and iron chloride) are marketed and distributed as well as (iii) residues are re-utilized, and (iv) heat is obtained from the municipal solid waste incineration plant – be operated ecologically despite the substantial operating material needs. Additional insights regarding the quality of by-products and residues may be gained during the next stages of the pilot period.

# 1. Ziel und Untersuchungsrahmen

Mit der Inkraftsetzung der neuen Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (VVEA) per Anfang 2016 wird die Rückgewinnung von Phosphor (P) aus P-reichen Abfällen wie Klärschlamm (KS) sowie Tier- und Knochenmehl in der Schweiz auf Verordnungsstufe vorgeschrieben. Eine 10-jährige Übergangsfrist sorgt dafür, dass die verfahrenstechnischen Ansätze zur P-Rückgewinnung markttauglich gemacht werden können. Die Stiftung ZAR entwickelt im Auftrag des Amtes für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) des Kantons Zürich zusammen mit dem spanischen Generalunternehmer und Entwickler Técnicas Reunidas SA (TR), Madrid, ein Verfahren, um aus KS-Asche (KSA) P-Säure zu produzieren: das phosphorlife (P4L)-Verfahren. Damit kann P-Säure aus der Primärproduktion (aus Rohphosphat) substituiert werden. Für Entscheidungen zum allfälligen zukünftigen Einsatz des neuen Verfahrens werden in diesem Bericht Grundlagen zum ökologischen Nutzen der P-Säureproduktion mit dem P4L-Verfahren im Vergleich zur P-Säure-Primärproduktion erarbeitet.

Die vergleichende Ökobilanz wird gemäss ISO 14040/44 (ISO 14040 2006, ISO 14044 2006) durchgeführt und umfasst folgende Schritte: 1) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen; 2) Sachbilanz; 3) Wirkungsabschätzung; 4) Auswertung.

Die **Systemgrenzen** der Ökobilanz sind in Abbildung 1 (Primärproduktion) und Abbildung 2 (P4L-Verfahren) illustriert. Sofern nicht anders erwähnt sind sämtliche Hintergrundprozesse (Ressourcenverbrauch, Energie, Transport etc.) der Produktionsschritte, sowie alle dazugehörigen Emissionen in die Umwelt, berücksichtigt. Nicht berücksichtigt ist die Infrastruktur der P-Säure-Produktion und -Reinigung. Sie spielt eine vernachlässigbare Rolle und rechtfertigt somit die aufwändige Datenerhebung für die Infrastruktur des P4L-Verfahrens nicht.

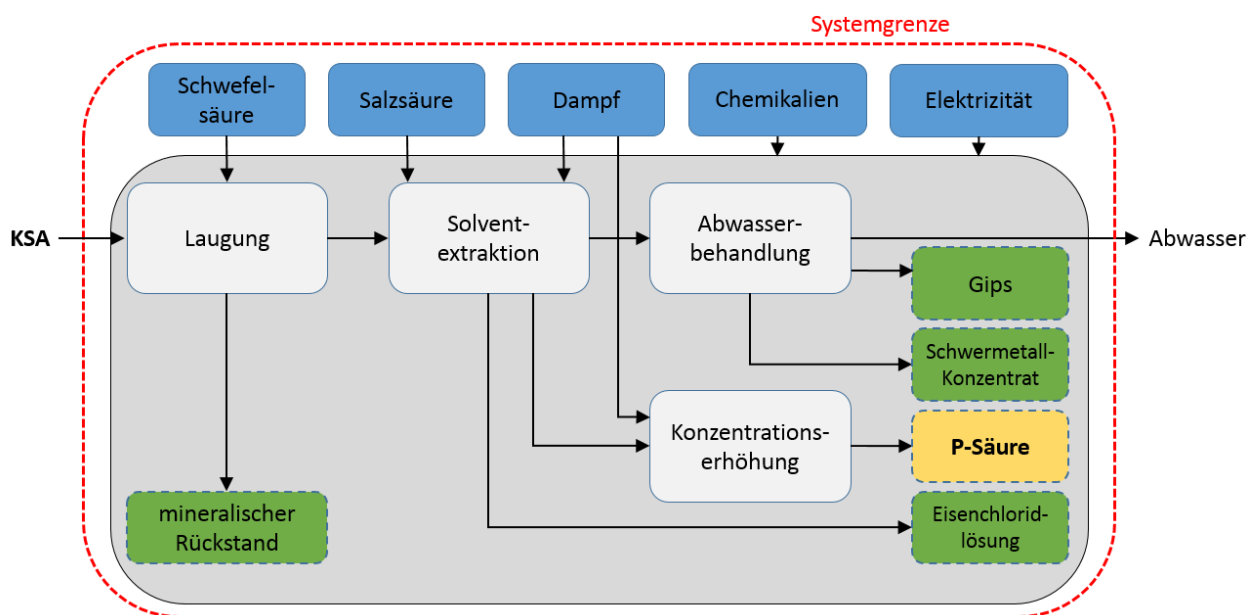


**Abbildung 1:** Systemgrenze P-Säure-Primärproduktion. Blau: Inputs. Grün: Nebenprodukte und Rückstände. Gelb: Hauptprodukt P-Säure.

Die Herstellung primärer P-Säure umfasst folgende Produktionsschritte:

- Rohphosphatabbau im Tagebau
- Aufbereitung des Rohphosphats auf eine Konzentration von ca. 32%  $P_2O_5$
- P-Säure Produktion im Nassverfahren (*dihydrate*; 51%  $P_2O_5$ )
- Reinigung der P-Säure für industrielle Anwendungen auf 62%  $P_2O_5$  (85%  $H_3PO_4$ )

Das Referenzszenario der P-Säure Primärproduktion soll den Ist-Zustand des Schweizer Markt-mixes möglichst präzise abbilden. Dabei geht es ausschliesslich um P-Säure, welche im Nassverfahren (*wet process*; nicht zu verwechseln mit dem Nass-/Trockenverfahren der Aufbereitung) hergestellt wurde, da thermisch hergestellte P-Säure (Anwendung in der Pharma- und Halbleiter-industrie) nicht durch die im P4L-Verfahren hergestellte sekundäre P-Säure substituiert wird. Als Basis wurde folgender ecoinvent v3.3-Prozess verwendet: *market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state* (Althaus et al. 2007, ecoinvent 2017).



**Abbildung 2:** Systemgrenze der P-Säure Herstellung mit dem P4L-Verfahren. Blau: Inputs. Grün: Nebenprodukte und Rückstände. Gelb: Hauptprodukt P-Säure. KSA=Klärschlamm-asche.

Die Herstellung sekundärer P-Säure mit dem P4L-Verfahren umfasst folgende Produktionsschritte:

- Laugung der Klärschlamm-asche (KSA)
- Eisenentfernung und P-Säure Reinigung durch Solventextraktion
- Konzentrationserhöhung der P-Säure auf eine Konzentration von 54%  $P_2O_5$  (75%  $H_3PO_4$ )



Das Referenzszenario des P4L-Verfahrens soll den geplanten Betrieb der P-Rückgewinnung in der Schweiz möglichst gut abbilden. Dabei spielen sowohl Standortsynergien als auch die Lieferanten und Abnehmer der Betriebsmittel und Nebenprodukte eine zentrale Rolle. Die benötigte Schwefelsäure wird voraussichtlich von der Kupferindustrie bezogen. Sie wurde als *burden free*<sup>1</sup> approximiert, da laut Aussagen eines europäischen Kupferproduzenten die zunehmenden Vorschriften bzgl. Abgasreinigung dazu geführt haben, dass Schwefelsäure beinahe ohne weiteren Aufwände „mitproduziert“ wird (siehe Tabelle 19 im Anhang). Die Salzsäure fällt in Europa zu grossen Teilen als Nebenprodukt in der Toluol-2,4-diisocyanat (TDI)-Produktion an. Die Umweltwirkung der Salzsäure wurde dabei durch ökonomische Allokation bestimmt (siehe Tabelle 23 im Anhang). Bei der Verwertung des Schwermetall (SM)-Konzentrats wurde die geplante Synergie mit dem SwissZinc-Prozess berücksichtigt, wo die Schwermetalle Zink, Blei, Cadmium und Kupfer recycelt werden (Schlumberger et al. 2017, Técnicas Reunidas 2018). Der SwissZinc-Prozess selbst ist nicht Teil der Systemgrenzen, da angenommen wird, dass es für den Prozess keine Rolle spielt, ob Hydroxidschlämme aus KVA-Filteraschen oder das SM-Konzentrat aus dem P4L-Verfahren als Input dienen. Die im SwissZinc-Prozess nicht zurückgewonnenen Elemente im Konzentrat wurden jedoch in die Ökobilanz einbezogen, wobei angenommen wurde, dass sie auf einer Reststoffdeponie deponiert werden müssen. Das P4L-Verfahren ist in unmittelbarer Nähe zu einer Kehrrechtverwertungsanlage (KVA) geplant. Dadurch kann überschüssige Prozesswärme ökologisch vorteilhaft bezogen werden. Für die Elektrizität wurde Schweizer Strom angenommen, da der Strom andernfalls ins Schweizer Netz eingespeist wird. Die **funktionelle Einheit** der Ökobilanz beträgt **1 kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (100%)**. Sämtliche Berechnungen und Vergleiche in diesem Bericht beziehen sich, falls nicht anders angegeben, auf diese Einheit. Die unterschiedlichen Konzentrationen der P-Säuren sind somit berücksichtigt.

Das Ziel der vergleichenden Ökobilanz ist einerseits, die totalen Umweltwirkungen primärer und sekundärer mittels P4L-Verfahren hergestellter P-Säure für verschiedene Umweltwirkungskategorien zu quantifizieren und zu vergleichen, und andererseits, Aussagen zu Umwelt-Hotspots sowie Sensitivitäten für beide Produktionspfade machen zu können.

---

<sup>1</sup> *burden free* (zu Deutsch: «ohne Belastung») bedeutet bei einer Ökobilanz «ohne Umweltwirkung» d.h. einem Produkt werden keine Umweltwirkungen angerechnet

## 2. Sachbilanz

### 2.1 Primärproduktion

Als Datengrundlage für die Inventare der Primärproduktion der P-Säure wurde die ecoinvent v3.3-*cut-off* Datenbank verwendet (ecoinvent 2017). Im Rahmen dieser Analyse wurden die betreffenden ecoinvent v3.3-Datensätze der heutigen Realität am besten entsprechend umfassend überarbeitet. Die wichtigsten Änderungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst, die angepassten Inventare aller Produktionsschritte inkl. Datengrundlagen befinden sich im Anhang 1.

**Tabelle 1:** Wichtigste Anpassungen im ecoinvent v3.3-Datensatz zur Primärproduktion der P-Säure.

Parameter	ecoinvent v3.3	angepasstes Inventar
Marktmix P-Säure Produktion	MA <sup>1</sup> : 3% US <sup>1</sup> : 32% RoW <sup>1</sup> : 65%	MA: 55% US: 5% IL <sup>1</sup> (neu erstellt): 40%
Marktmix gereinigte P-Säure	RER <sup>1</sup> : 33% RoW <sup>1</sup> : 67%	RER: 100%
Aufbereitung Rohphosphat	MA: Trockenverfahren US: Flotationsverfahren	MA, US: Flotationsverfahren IL: Trockenverfahren
Auswaschung P-Gips-Halde: Anteil Kurz-/Langzeitemissionen		IL: 0.001%/7% (Niederschlag: 200 mm/a; Modell: Althaus et al. 2007)
Chemische Zusammensetzung P-Gips	aufgrund chem. Zusammensetzung P-Gestein und Transferkoeffizienten	neu berechnet
Langzeitemissionen <sup>2</sup>	nicht berücksichtigt	berücksichtigt
Rückstand aus P-Säure-Reinigung	Deponierung	direkte Emission in Boden (über Düngemittelproduktion)
Datengrundlage S-Säure Menge	Becker 1989	Gilmour 2013 (abhängig von Zusammensetzung P-Gestein)
Datengrundlage P-Gips Menge	Becker 1989	Gilmour 2013 (abhängig von Zusammensetzung P-Gestein)
Datengrundlage chemische Zusammensetzung Rohphosphat	Becker 1989	Gilmour 2013, EC 2007, Becker 1989

<sup>1</sup> MA: Marokko; US: USA; IL: Israel; RER: Europa; RoW: Rest of the World

<sup>2</sup> Kurzzeitemissionen: <100a, Langzeitemissionen: 100–60'000a (Deponien)

Die Handelswege von P sind komplex: sowohl aufbereitetes Rohphosphat als auch ungereinigte und gereinigte P-Säure werden auf dem Weltmarkt gehandelt. Der berechnete P-Säure-Marktmix für die Schweiz (55% Marokko, 5% USA und 40% Israel) basiert hauptsächlich auf Aussenhandelsdaten und Marktberichten (UN 2017, Agrimoney 2017). Die Herkunftsanalyse ist aufgrund der komplexen Handelswege und teils fehlender Datengrundlage mit gewissen Unsicherheiten

behaftet. Diese und weitere kritische Annahmen bzw. Vereinfachungen sowie deren Auswirkungen auf die Resultate werden im Kapitel 4.1 diskutiert.

Die verwendeten Datensätze der Primärproduktion von P-Säure beschreiben das *dihydrate*-Verfahren mit Schwefelsäure als Betriebsmittel (Althaus et al. 2007). Die Hauptunterschiede im Produktionsverfahren der drei Herkunftsländer sind:

- Rohphosphataufbereitung: Nass- (US, MA) und Trockenverfahren (IL). Beim Nassverfahren (auch: Flotationsverfahren) liegt das aufbereitete Rohphosphat in wässriger Lösung, dem sogenannten *slurry*, vor und wird zum Transport durch ein Rohrsystem gepumpt. Beim Trockenverfahren wird nur ein Teil des Phosphats der Flotation zugeführt (und anschliessend getrocknet). Der Rest wird trocken aufbereitet. Die ecoinvent v3.3-Prozesse wurden wo nötig angepasst, z.B. hat Marokko vom Trocken- auf das Nassverfahren umgestellt (Geissler 2017). Für Israel wurde das Trockenverfahren angenommen, da die Transporte mittels Zug stattfinden.
- P-Gips-Verwertung: in Marokko wird der verunreinigte P-Gips direkt ins Meer geleitet (diese Praxis ist in Europa mittlerweile verboten), in Israel und den USA wird er in Gipshalden gestapelt. Von den Gipshalden sind Kurz- und Langzeitemissionen durch die Auswaschung in die Gewässer berücksichtigt, Emissionen durch Wind werden mangels Daten vernachlässigt. Es wäre prinzipiell möglich, den P-Gips zu reinigen und z.B. im Bausektor zu verwenden, allerdings konnte dafür bisher in der Regel kein Markt geschaffen werden, weshalb diese Variante für die Analyse ausgeschlossen wird (EC 2007).
- Betriebsmittel: Die Mengen der Betriebsmittel hängen zu einem gewissen Teil von der chemischen Zusammensetzung der Erze ab, bewegt sich jedoch bei allen drei Produktionsländern in der gleichen Grössenordnung. Im Gegensatz zu den bestehenden ecoinvent v3.3-Datensätzen wurde diese Abhängigkeit wo gegeben aufgrund Daten von Gilmour et al. 2013 berücksichtigt.

Während dem Reinigungsprozess der P-Säure entsteht neben der sauberen, gereinigten P-Säure eine mit Schadstoffen und Schwermetallen angereicherte „dreckige“ P-Säure, die sogenannte Raffinatsäure (*raffinate acid*). Die übliche Praxis ist, dass diese Raffinatsäure in die Düngemittelproduktion gelangt und dort mit konventioneller P-Säure in Düngemittelqualität vermischt wird (Gilmour 2013). Somit gelangen diese Schadstoffe auf lange Sicht vollständig in landwirtschaftliche Böden. Diese Praxis steht im Gegensatz zum ecoinvent v3.3-Datensatz, welcher die Deponierung des abgetrennten Reinigungsrückstands beschreibt. Die Datensätze wurden für das Referenzszenario entsprechend angepasst.

Die Transportwege wurden für die einzelnen Herkunftsländer angepasst, Landverbrauch und Minen-Infrastruktur wurde von ecoinvent v3.3 übernommen (und für Israel durch Marokko approximiert).

## 2.2 P4L-Verfahren

Die Sachbilanz der Sekundärproduktion mittels P4L-Verfahren besteht aus Daten von TR. Die Daten basieren auf Pilotversuchen von Dezember 2017/ Januar 2018 (Técnicas Reunidas 2018). Der Ausgangspunkt für die Berechnung der Sachbilanz der Sekundärproduktion ist die KSA, welche im Werdhölzli in Zürich anfällt (siehe Tabelle 17 im Anhang 2).

Das P4L-Verfahren ist charakterisiert durch beträchtliche Betriebsmittelaufwendungen (3.57 kg Schwefelsäure und  $5.74^2$  kg Salzsäure pro kg  $H_3PO_4$ ), und dementsprechend grosse Mengen an Nebenprodukten (3.63 kg Eisen(III)chloridlösung und  $2.06^2$  kg Salzsäure pro kg  $H_3PO_4$ ). Diese Aufwände und Gutschriften (durch Substitution von äquivalenten Primärprodukten) bestimmen zu einem grossen Teil die Umweltwirkung des P4L-Verfahrens. Die Prozess- und Rückstandsemissionen spielen eine untergeordnete Rolle. Für die ökologische Bewertung dieser (Neben-) Produkte gibt es verschiedene Ansätze, welche im Kapitel 4.2.1 genauer erläutert werden. Für das Referenzszenario wurden die Salz- und Schwefelsäureprozesse, sowie der Prozess der Eisen(III)chloridlösung aus ecoinvent v3.3 aufgrund der aktuellen Situation in Europa bzw. in der Schweiz angepasst (siehe Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 im Anhang 2), da die ecoinvent v3.3-Prozesse diese nur unzureichend abbilden. So wurde die Schwefelsäure als *burden free* approximiert und die Salzsäure als Nebenprodukt der TDI-Produktion mittels ökonomischer Allokation bestimmt (siehe Tabelle 23 im Anhang 2). Der ecoinvent v3.3-Marktmix der Eisen(III)chlorid-Produktion wurden aufgrund neuer BVT-Bestimmungen in der EU angepasst (siehe Tabelle 22 im Anhang 2).

Des Weiteren fallen beim P4L-Verfahren folgende Rückstände an: ein mineralischer Laugungsrückstand, weisser Gips und das Schwermetall (SM)-Konzentrat mit dem Grossteil der Schadstoffe. Laut den Angaben von TR können Laugungsrückstand und Gips von der Zementindustrie abgenommen werden, wo sie Gips und Mergel substituieren (Annahmen dazu siehe Tabelle 26 im Anhang). Die Verwertung des SM-Konzentrat im SwissZinc-Prozess ermöglicht die Rückgewinnung der Elemente Zink, Blei, Cadmium und Kupfer (Schlumberger et al. 2017). Die Analyse für diesen Bericht umfasst alle restlichen Elemente im Konzentrat, für welche angenommen wird, dass sie deponiert werden. Die Transferkoeffizienten für die Auswaschung aus der Deponie ins Grundwasser wurden aufgrund fehlender Daten für die Schweiz von der Deponierung des Reinigungsrückstands des P-Säure-Prozesses in ecoinvent v3.3 übernommen. Eine genauere

---

<sup>2</sup> Werte angepasst aufgrund der Säurekonzentration

Analyse des SwissZinc-Prozesses und möglicher Folgen für die Inventarisierung des P4L-Verfahrens ist erst möglich, wenn erste Erfahrungswerte dazu existieren.

Sowohl für die Primär- als auch Sekundärproduktion wurde in einem ersten Schritt ein Referenzszenario (Ist- bzw. plausibelster Zustand) inventarisiert. Das Referenzinventar der Sekundärproduktion mittels P4L-Verfahren ist in Tabelle 2 aufgelistet. Die detaillierten Inventare des P4L-Verfahrens inkl. Datengrundlagen sind in Anhang 2 aufgelistet.

**Tabelle 2:** Inventar des P4L-Verfahrens (Referenzszenario). Die angegebenen Werte beziehen sich auf 1 kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Substanz	ecoinvent-Prozess (v3.3)	Einheit	Ort	
Eisen(III)chloridlösung	market for iron (III) chloride, without water, in 40% solution state*	kg	CH	-3.63
Salzsäure (Produkt)	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state*	kg	RER	-2.06
Salzsäure (Input)	market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state*	kg	RER	5.74
Schwefelsäure	sulfuric acid ( <i>burden free</i> )	kg	RER	3.57
Kalk	market for lime, packed*	kg	CH	0.534
Kalkstein	market for limestone, crushed, for mill	kg	CH	1.64
Laugungsrückstand	market for leaching residue, from phosphoric acid production*	kg	CH	-5.20
Weisser Gips	market for waste gypsum, from phosphoric acid production*	kg	CH	-1.58
Schwermetall-Konzentrat	market for heavy metal concentrate, from phosphoric acid production*	kg	CH	-0.0671
Trinkwasser, demin.	market for water, deionised, from tap water, at user	kg	CH	14.37
Trinkwasser	market for tap water	kg	CH	14.78
Wärme, Prozess	heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	12.1
Wärme, Trocknung Laugungsrückstand	heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	11.5
Wärme, Trocknung Gips	heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	1.71
Elektrizität	market for electricity, medium voltage	kWh	CH	1.77

\* Prozesse mit einem Stern (\*) sind angepasste oder selbst modellierte Prozesse (siehe Anhang 1 und 2)

### 3. Wirkungsabschätzung

Tabelle 3 listet die in dieser Analyse verwendeten Wirkungsindikatoren für die Wirkungsabschätzung. Die Auswahl erfolgte einerseits aufgrund des Kontexts Schweiz und andererseits aufgrund von Erfahrungen bisheriger Ökobilanz-Studien in diesem Feld (Remy 2015, Remy & Kraus 2017). Die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden soll insbesondere

- eine umfassende Analyse aus Sicht der Umwelt ermöglichen, d.h. sämtliche relevanten Umweltwirkungen einschliessen, sowie
- die Vergleichbarkeit dieser Arbeit mit anderen Ökobilanz-Studien im Bereich des P-Recycling ermöglichen.

**Tabelle 3:** Übersicht der Wirkungsindikatoren für die Wirkungsabschätzung. CTU = comparative toxic units

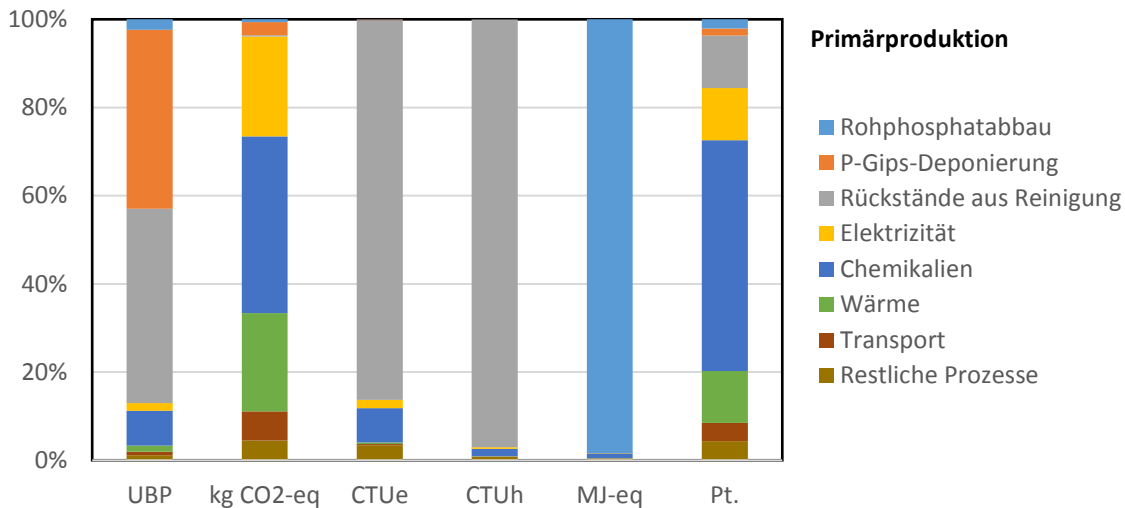
Wirkungsindikator	Abk.	Einheit	Hauptbeitragende Substanzen	Quelle
Umweltbelastungspunkte	UBP	UBP	Schwermetalle, fossile Brennstoffe	Frischknecht et al. 2008
Klimawandel	GWP	kg CO <sub>2</sub> -eq	CO <sub>2</sub> (fossil), N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>	IPCC 2013
Ökotoxizität (Süsswasser)	ETP	CTU <sub>e</sub>	Schwermetalle, organische Schadstoffe	Rosenbaum et al. 2008
Humantoxizität	HTP	CTU <sub>h</sub>	Schwermetalle, organische Schadstoffe	Rosenbaum et al. 2008
Cumulative exergy demand, minerals	CExD	MJ-eq	Mineralressourcen	Bösch et al. 2006
ReCiPe, total (H)	-	Pt.	fossile Brennstoffe, Emissionen in Luft und Wasser	Goedkoop et al. 2009

Tabelle 4 listet die Resultate der Wirkungsabschätzung für die beiden Referenzszenarien. Während die Primärproduktion eine Netto-Umweltwirkung aufzeigt, entstehen beim P4L-Prozess für alle Wirkungsabschätzungsmethoden Gutschriften, welche die Umweltwirkungen der Aufwände übersteigen (=negativer Netto-Wert).

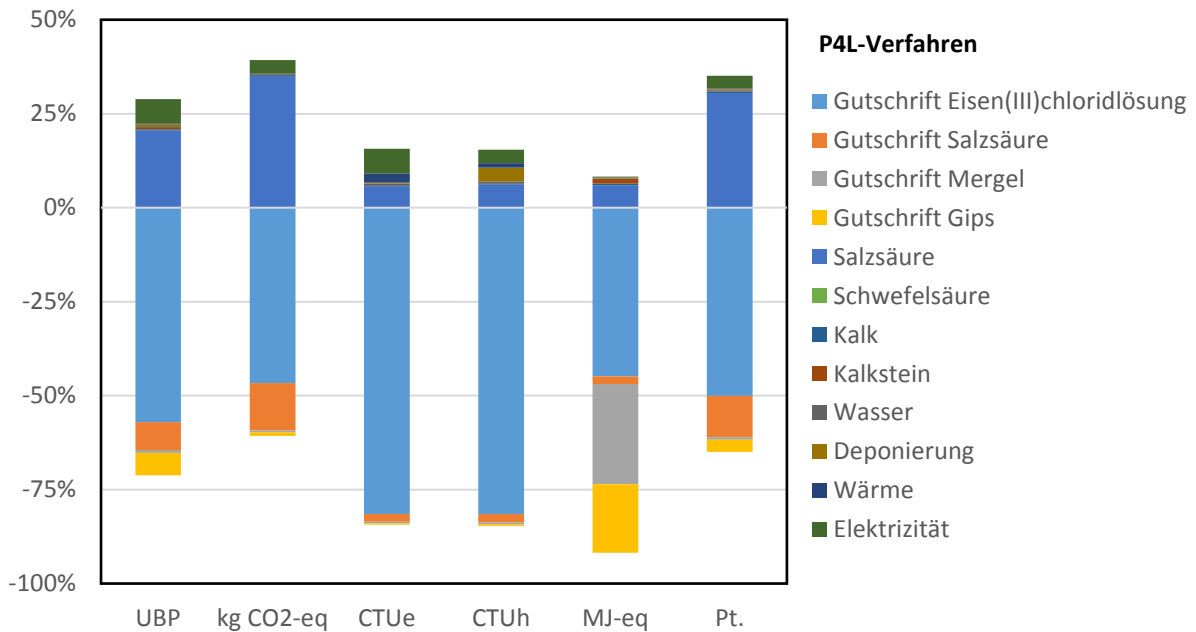
**Tabelle 4:** Resultate der Wirkungsabschätzung für die Primärproduktion und für das P4L-Verfahren (je für das Referenzszenario).

pro kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	UBP [UBP]	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq]	ETP [CTU <sub>e</sub> ]	HTP [CTU <sub>h</sub> ]	CExD [MJ-eq]	ReCiPe, total [Pt.]
Primärproduktion	20'592.64	1.72	69.6	2.85E-05	4.46	0.32
P4L-Verfahren	-2'898.65	-1.00	-18.7	-1.68E-06	-0.99	-0.15

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen für die beiden Referenzszenarien jeweils die Anteile der Umweltwirkungen aufgeschlüsselt nach Betriebsmittel und Prozessstufen. Beim P4L-Verfahren werden alle Betriebsmittel einzeln unterschieden, bei der Primärproduktion ist die Unterteilung der Übersicht zuliebe etwas gröber (siehe Abbildung 12 im Anhang für eine detailliertere Aufschlüsselung der Primärproduktion).



**Abbildung 3:** Referenzszenario Primärproduktion: Wirkungsabschätzung aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln und Prozessstufen. „Rückstände aus Reinigung“ beinhaltet die Verunreinigungen, welche in die Rückstandssäure gelangen. „Restliche Prozesse“ beinhaltet alle weiteren direkten Emissionen der Prozessschritte.



**Abbildung 4:** Referenzszenario P4L-Verfahren: Wirkungsabschätzung aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln. Der Betrag der Beiträge gibt in der Summe jeweils 100%. Diese Art der Darstellung dient in erster Linie dazu, die Anteile der Betriebsmittel aufzuzeigen, die absoluten %-Werte in der y-Achse sind dabei sekundär. Die Gutschriften betreffen Nebenprodukte, welche äquivalente Primärprodukte ersetzen.

Was die Primärproduktion angeht sind die Anteile je nach Wirkungsabschätzungsmethode sehr unterschiedlich, da die gewählten Methoden verschiedene Umweltwirkungen abdecken. Während bei der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) sowohl die Emissionen in die Gewässer (verunreinigter P-Gips) als auch in den Boden (schwermetallhaltige Rückstandssäure) dominieren, spielen bei USEtox – sowohl bei der Öko- als auch Humantoxizität – primär letztere eine Rolle. Bei der CE<sub>x</sub>D-Methode (Mineralien) dominiert fast alleinig der Rohphosphatabbau. Dies ist nicht überraschend, da die abgebaute Ressource P diesem Prozessschritt angerechnet wird. Bei Klimawandel und ReCiPe zeigt sich ein ausgewogeneres Bild, zudem kann zwischen den beiden Methoden eine gewisse Korrelation beobachtet werden. Bei beiden Methoden spielen Energie (Wärme und Elektrizität) sowie Transport eine grössere Rolle als bei den anderen Methoden. Dies schlägt sich auch bei den Chemikalien nieder, für deren Produktion grosse Energiemengen nötig sind. Folgendes kann für die Primärproduktion zusammengefasst werden:

- die Verunreinigungen der Phosphaterze, welche während dem P-Säure-Produktionsprozess aus den Erzen herausgelöst werden, landen zu grossen Teilen in der Umwelt (im P-Gips entweder direkt im Meer oder auf längere Sicht im Grundwasser aus Deponieabwasser, sowie die Rückstandssäure über den Umweg Düngemittelindustrie im Boden). Dies betrifft insbesondere Cadmium und Uran, aber auch Chrom, Nickel und Zink. Dies schlägt sich insbesondere in den Wirkungsabschätzungsmethoden UBP und USEtox nieder. Da davon ausgegangen wird, dass zukünftig abgebaute Phosphatreserven tendenziell zunehmende Verunreinigungen aufweisen, insbesondere was Uran- und Cadmium-Gehalte angeht, könnte sich dieses Problem verschärfen (De Ridder et al. 2012, Gilmour 2013).
- die beträchtlichen Aufwände für Chemikalien und Energie zeigen sich vor allem in den Wirkungsabschätzungsmethoden GWP und ReCiPe. Für die P-Säure-Produktion sind insbesondere grosse Mengen an Schwefelsäure nötig, welche in den betrachteten Ländern ausschliesslich aus Elementar-Schwefel produziert wird, wofür grosse Schwefelmengen und Infrastrukturaufwände nötig sind. Bei der ReCiPe-Methode macht alleine die Schwefelsäure 45.6% aller Umweltwirkungen aus.
- die weiten Transportwege spielen nur beschränkt eine Rolle (6.6% der Gesamtumweltwirkung bei Klimawandel, 4.2% bei ReCiPe)

Beim P4L-Verfahren zeigt sich ein leicht ausgewogeneres Bild zwischen den Wirkungsabschätzungsmethoden: es werden keine Primärressourcen abgebaut, die Verunreinigungen in den Rückständen spielen eine weniger bedeutende Rolle. Dementsprechend sorgen die Betriebsmittel für die grössten Umweltwirkungen, sowohl auf der Input- als auch auf der Outputseite. Auf der Inputseite ist die Salzsäure je nach Wirkungsabschätzungsmethode für 37-89% der Umweltwirkungen verantwortlich. Dies hat zwei Hauptgründe: der grosse Bedarf (knapp 6 kg pro kg



H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) sowie die Annahme im Referenzszenario, dass die ebenfalls benötigte Schwefelsäure *burden free* erhalten wird und ihr somit keine Umweltwirkungen angerechnet werden (siehe Kapitel 4.1). Die benötigte Wärme spielt keine Rolle, da sie im Referenzszenario ökologisch vorteilhaft von der KVA bezogen wird. Auf der Seite der Nebenprodukte ist die produzierte Eisen(III)chloridlösung bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden mit Abstand am bedeutendsten. Die dadurch eingesparten Umweltwirkungen (durch Substitution des Primärprodukts) wiegen die Belastung durch die Salzsäure mehr als auf, insbesondere bei USEtox und der CE<sub>x</sub>D-Methode. Der Hauptgrund dafür ist die energieintensive Chlorproduktion, sowie mit der Produktion verbundene Emissionen in die Luft und ins Abwasser (Althaus et al. 2007, Brinkmann et al. 2014). Dazu wird ein kleiner Teil der zuvor verwendeten Salzsäure zurückgewonnen, der für weitere Gutschriften sorgt. Bei der CE<sub>x</sub>D-Methode spielen zudem die im Zementwerk substituierten Produkte Mergel und Gips eine Rolle, da dadurch Primärressourcen eingespart werden können. Zusammenfassend kann gesagt werden:

- die co-produzierte Eisen(III)chloridlösung dominiert die Umweltwirkungen des P4L-Verfahrens bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden, insbesondere bei USEtox (sowohl Öko- als auch Humantoxizität), und kann die Betriebsaufwände bei allen Methoden mehr als kompensieren. Diese Erkenntnis ist allerdings zu einem grossen Teil auf die Annahme zurückzuführen, dass die Betriebsmittel ökologisch günstig bezogen werden können (im Falle der Schwefelsäure *burden free*). Diese Annahme ist auf Grund der heutigen Säuremärkte berechtigt (Aurubis 2018, Hollemann & Wiberg 2007), dieecoinvent v3.3-Datenbank bildet die heutige Lage nur sehr unzureichend ab (Vernachlässigung der Sekundärprodukte in Marktmix, teils veraltete oder fehlende Prozesse). Dennoch ist es wichtig, diese Annahmen bezüglich der Allokation kritisch zu hinterfragen (siehe Kapitel 4.2.1).
- durch die Synergie mit der KVA kann die Wärme ökologisch vorteilhaft bezogen werden. Da der zusätzliche Elektrizitätsbedarf des Prozesses eher gering ist, spielt die Prozessenergie bei den Umweltwirkungen eine untergeordnete Rolle.
- in die Umwelt gelangende Verunreinigungen spielen ebenfalls eine geringe Rolle. Durch die Verwendung des SM-Konzentrats im SwissZinc-Prozess werden die Schwermetalle Zink, Blei, Cadmium und Kupfer recycelt (Schlumberger et al. 2017). Die Deponierung des verbleibenden Rückstands führt bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden zu eher geringen Umweltwirkungen.

## 4. Interpretation und Diskussion

Die Auswertung behandelt die folgenden Punkte:

- kritische Diskussion (Annahmen, Unsicherheiten) der beiden Referenzszenarien
- Sensitivitätsanalyse der wichtigsten Parameter beider Produktionspfade mittels Best- und Worst-Case-Szenarien, sowie Anwendung verschiedener Allokationsverfahren
- kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen aller Wirkungsindikatoren
- Einbettung der Resultate in den Gesamtkontext (räumlich, zeitlich, technologisch)
- Auflistung der wichtigsten Schlussfolgerungen der Studie

### 4.1 Diskussion der Referenzszenarien

#### 4.1.1 Primärproduktion

**Marktmix** Der dominierende Anteil von P-Säure marokkanischer Herkunft widerspiegelt den Ist-Zustand und ist nicht zuletzt aufgrund USGS-Daten aus dem Jahr 2012 zu den weltweiten Phosphatreserven gerechtfertigt: in Marokko befinden sich demnach mit rund 50'000 mmt gut 70% der weltweiten Phosphatreserven (De Ridder et al. 2012). Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass der Marktanteil an P-Säure mit marokkanischem Ursprung in Europa in Zukunft eher noch zunimmt. Der ermittelte P-Säure-Marktmix beinhaltet einige weitere Vereinfachungen: P-Säure aus vulkanischen Phosphatreserven in Russland/Finnland spielt auf dem europäischen Markt eine geringfügige Rolle, mangels Daten zu Erzqualität und Herstellungsprozess wurde dieser Prozess jedoch vernachlässigt. Phosphatvorkommen in Saudi-Arabien werden in Zukunft sowohl für den europäischen als auch weltweiten P-Säuremarkt eine Rolle spielen; Phosphatgehalt, Transportwege und Klima (und somit Auswaschung der Verunreinigungen im P-Gips ins Grundwasser) wurden jedoch als vergleichbar zu Israel angenommen. Die USA haben sich in den letzten Jahren zu einer P-Net-Importeurin gewandelt und werden in Zukunft aufgrund der Neige gehenden Phosphatvorkommen voraussichtlich keine Rolle mehr auf dem europäischen Markt spielen (De Ridder et al. 2012, Gilmour 2013). Der Marktanteil der USA von rund 5% widerspiegelt den Ist-Zustand der letzten Jahre. Es wird angenommen, dass die nicht berücksichtigten Phosphatvorkommen mit Relevanz für den europäischen Markt die Resultate nur unwesentlich beeinflussen.

**Produktionsverfahren** für nasse, nicht gereinigte P-Säure (*merchant grade acid*, MGA). Es existieren neben dem *dihydrate*-Verfahren weitere Nassverfahren, welche im Vergleich jedoch von untergeordneter Bedeutung sind (EC 2007, Gilmour 2013). Gleiches gilt für Verfahren, welche Salz- oder Salpetersäure zur Laugung verwenden. Der Anteil dieser P-Säuren im Schweizer Marktmix wird auf unter 10% geschätzt (Cotto 2018). Somit ist die Verwendung der ecoinvent-Datensätze als Basis für diese Analyse gerechtfertigt.

Die Unterschiede im Produktionsverfahren der drei Herkunftsländer Marokko, USA und Israel fallen insbesondere bei der UBP-Methode ins Gewicht, da die direkte Einleitung des P-Gipses ins Meer in Marokko durch die darin enthaltenen Verunreinigungen (insbesondere Schwermetalle und Uran) für beträchtliche Umweltwirkungen sorgt. Auch Unterschiede bezüglich Wärme- und Elektrizitätsmische sind über die gesamte Produktion gesehen bei Klimawandel und ReCiPe von Bedeutung, wurden in der Analyse jedoch auch berücksichtigt. Die Umweltwirkungen der beiden Aufbereitungsverfahren (nass: Marokko und USA, trocken: Israel) sind in Bezug auf alle verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden ähnlich, und der Anteil der Aufbereitung an der Gesamtumweltwirkung ist abgesehen vom CE<sub>x</sub>D eher gering (maximal 12.5%, Klimawandel). Aus diesem Grund fallen entsprechende Annahmen nicht stark ins Gewicht.

Aufgrund des trockenen Klimas in Israel ist anzunehmen, dass Windemissionen aus den Gipshalden die Auswaschung ins Grundwasser überwiegt. Es kann dadurch davon ausgegangen werden, dass die Emissionen aus den Gipshalden in dieser Analyse unterschätzt werden. Um sie zu quantifizieren bräuchte es jedoch zusätzliche Daten, welche im Rahmen des Projekts nicht erhoben werden konnten. Die technische Möglichkeit, den P-Gips im Produktionsprozess zu reinigen und z.B. im Bausektor zu verwenden, wurde für die Analyse aus zwei Gründen ausgeschlossen: (i) in der Vergangenheit konnte dafür in der Regel kein Markt geschaffen werden (EC 2007), (ii) diese Möglichkeit ist mit dem heutzutage angewendeten *dihydrate*-Verfahren verfahrenstechnisch nicht gegeben, für alternative Produktionsverfahren fehlt die Datengrundlage.

Transportwege wurden angepasst, Landverbrauch und Minen-Infrastruktur wurde von ecoinvent übernommen (und für Israel durch Marokko approximiert). Die Infrastruktur für die P-Säure-Produktion sowie -Reinigung wurde vernachlässigt, da diese auch beim P4L-Verfahren nicht berücksichtigt wird. Zudem ist die Infrastruktur der P-Säure-Produktion und -Reinigung bei der Primärproduktion für alle Wirkungsabschätzungsmethoden vernachlässigbar.

**Rückstände** In Bezug auf Öko- und Humantoxizität ist die schwermetallhaltige Rückstandssäure (Raffinatsäure, *raffinate acid*) aus der P-Säure Reinigung besonders relevant, da sich darin der Grossteil der Verunreinigungen bzw. Schadstoffe befindet. Da die Annahme, dass die Raffinatsäure in die Düngemittelproduktion gelangt und durch den Düngeraustrag langfristig in landwirtschaftlichen Böden landet, grossen Einfluss auf die Ökobilanz hat, wurde die Deponierung – so wie sie im ecoinvent v3.3-Datensatz beschrieben wird – in einem Best-Case-Szenario im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mitberücksichtigt.

#### 4.1.1 P4L-Verfahren

**Produktionsverfahren** Das P4L-Verfahren ist noch nicht grosstechnisch erprobt, dementsprechend beschränkt sich die Datenlage auf Hochrechnungen von Pilotversuchen im Dezember

2017/Januar 2018. Dies betrifft nicht nur das Verfahren an sich, sondern auch Annahmen zu Bezug und Verkauf bzw. Verwertung von Betriebsmitteln, Nebenprodukten und Rückständen sowie Synergien im Wärmemanagement. Laut TR ist die Verwertung der Rückstände noch Gegenstand von Abklärungen sowie abhängig von weiteren Prozessoptimierungen, und erst nach Ende der Pilotversuche im Juni 2018 geklärt (Técnicas Reunidas 2018). Diese Unsicherheiten wurden in einem Worst-Case-Szenario im Rahmen der Sensitivitätsanalyse kritisch betrachtet.

Die Anpassungen des Salzsäure-Prozesses sorgen dafür, dass die Umweltwirkungen von in Europa hergestellter Salzsäure nicht überschätzt werden. Da die Salzsäurepreise stark schwanken, wurden für die ökonomische Allokation die Marktpreise von ecoinvent v3.3 als konservativer Ansatz verwendet (Althaus et al. 2007). Diese Annahme hat einen direkten Einfluss auf die angerechnete Umweltwirkung der Salzsäure und somit auf die totale Umweltwirkung des P4L-Verfahrens und sollte bei der Betrachtung der Resultate im Hinterkopf behalten werden.

**Nebenprodukte** Die mitproduzierte Eisen(III)chloridlösung spielt eine zentrale Rolle der totalen Umweltwirkung. Die Anpassungen der Marktanteile des ecoinvent v3.3-Prozesses aufgrund neuer BVT-Bestimmungen in der EU ermöglichen eine bedeutend realistischere Einschätzung der Umweltwirkungen des Status-Quo. Auf der anderen Seite wurden die Emissionswerte aufgrund fehlender Daten nicht angepasst, womit angenommen werden kann, dass die Umweltwirkungen der Primärproduktion (und somit die Gutschrift für die mitproduzierte Eisen(III)chloridlösung) tendenziell überschätzt werden, da die Emissionsgrenzwerte in der Zwischenzeit verschärft wurden. Für eine weitere Analyse würde sich demnach lohnen, die Eisen(III)chlorid-Primärproduktion genauer unter die Lupe zu nehmen.

**Rückstände** Für die Verwertung des SM-Konzentrats sind in der Schweiz grundsätzlich zwei Wege möglich: die Verwertung über langjährig etablierte Pfade analog zu saurer Flugaschenwäsche (FLUWA) bzw. Flugaschenrecycling (FLUREC) oder der sich in fortgeschrittener Planung befindende SwissZinc-Prozess (Schlumberger et al. 2017). Da für die betroffenen Elemente im SM-Konzentrat kein Modell zur Quantifizierung der Auswaschung aus der Reststoffdeponie vorlag, wurden die Transferkoeffizienten des P-Säure-Reinigungsrückstandes aus ecoinvent v3.3 übernommen. Dies ist eine grobe Vereinfachung, da allfällige Einflussfaktoren der Auswaschung wie Calcium- und Magnesiumkonzentrationen zur Regulierung des pH nicht mitberücksichtigt sind. Eine detailliertere Analyse dieser Prozesse würde den Rahmen dieser Studie jedoch sprengen. Um den Fall, dass das SM-Konzentrat nicht im SwissZinc-Prozess verwertet werden kann, mit zu berücksichtigen, wurde für das Worst-Case-Szenario angenommen, dass sämtliche Elemente im Konzentrat auf der Reststoffdeponie landen.

## 4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse soll

- die zentralsten Parameter aus der Wirkungsabschätzung untersuchen, sowie
- Unsicherheiten und Annahmen der Referenzszenarien (siehe Kapitel 4.1) in einen grösseren Kontext setzen.

Aus diesem Grund wurden zwei weitere Szenarien entworfen: ein Best-Case-Szenario für die Primärproduktion und ein Worst-Case-Szenario für das P4L-Verfahren (siehe Tabelle 5). Es handelt sich bei beiden Szenarien um „was wäre wenn“-Fälle, welche aufgrund der vorhandenen Datenlage erstellt wurden. Das Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens betrachtet insbesondere den Fall, dass Standortsynergien und Rückstandsverwertungen nicht wie geplant stattfinden. Ein Vergleich mit dem Best-Case-Szenario der Primärproduktion soll aufzeigen, ob das P4L-Verfahren auch unter diesen Bedingungen ökologisch vorteilhaft ist.

**Tabelle 5:** Übersicht der Sensitivitätsanalysen: Best-Case-Szenario für die Primärproduktion sowie Worst-Case-Szenario für das P4L-Verfahren.

Parameter	Referenzszenario	Best-Case-Szenario	Worst-Case-Szenario
<b>Primärproduktion</b>			
Enddestination Rückstand (P-Säure Reinigung)	direkte Emission in Boden	Deponierung	
P-Gips Entsorgung (MA)	direkt ins Meer	Gipshalde	
Langzeitemissionen (P-Gips)	berücksichtigt	nicht berücksichtigt	
Schwefelsäure-Produktion	Primärproduktion	<i>burden free</i>	
<b>P4L-Verfahren</b>			
Schwefelsäure-Produktion	<i>burden free</i>		Primärproduktion
Salzsäure-Produktion	Nebenprodukt der TDI-Produktion		ecoinvent-Marktmix
Verwertung des mineralischen Laugungsrückstandes	Zementwerk		Inertstoffdeponie
Verwertung des Gipses	Zementwerk		Inertstoffdeponie
Verwertung des SM-Konzentrats	SwissZinc-Prozess (und Reststoffdeponie)		Reststoffdeponie
Prozess-Wärme	KVA		Erdgas-Brenner

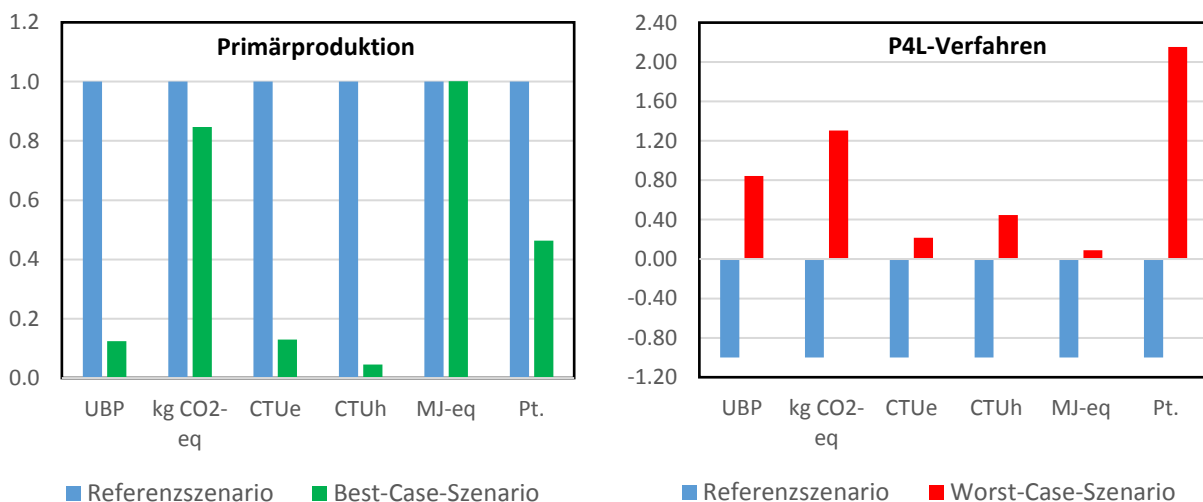
Des Weiteren wird die ökologische Bewertung der Betriebsmittel und Nebenprodukte des P4L-Verfahrens kritisch untersucht und konsequent mit den beiden Allokationsmethoden *ökonomische Allokation* und *cut-off* gerechnet (Kapitel 4.2.1). Schliesslich wird der Trade-Off

zwischen Energiebedarf der Trocknung und Substitution im Zementwerk bei der Verwertung von Laugungsrückstand und Gips untersucht (Kapitel 4.2.2).

Tabelle 6 listet die Resultate der Wirkungsabschätzung für die beiden Referenzszenarien, sowie für das Best-Case-Szenario (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren). Die Wirkungsabschätzungen aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln und Prozessstufen sind im Anhang 4 abgebildet. Die Abweichungen zu den Referenzszenarien sind bei den verschiedenen Wirkungsabschätzungsmethoden ziemlich unterschiedlich und grösstenteils substantiell (siehe Abbildung 5). Die veränderte Verwertung der Rückstände sowie die Nichtberücksichtigung der Langzeitemissionen beim Best-Case-Szenario der Primärproduktion zeigen sich in deutlichen Reduktionen der Umweltwirkung bei UBP und USEtox. Die Reduktionen bei Klimawandel und ReCiPe sind dagegen hauptsächlich aufgrund der *burden free*-Annahme der Schwefelsäure. Bei der CExD-Methode zeigt sich keine Änderung, da der P-Ressourcenverbrauch unverändert ist und alle weiteren Ressourcenverbräuche dazu vernachlässigbar sind.

**Tabelle 6:** Resultate der Wirkungsabschätzung für die Primärproduktion und für das P4L-Verfahren (Best-Case-Szenario in grün, Worst-Case-Szenario in rot).

pro kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	UBP [UBP]	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq]	ETP [CTU <sub>e</sub> ]	HTP [CTU <sub>h</sub> ]	CExD [MJ-eq]	ReCiPe, total [Pt.]
Primärproduktion	20'592.64	1.72	69.55	2.85E-05	4.46	0.32
	2'558.16	1.46	9.01	1.30E-06	4.46	0.15
P4L-Verfahren	-2'898.65	-1.00	-18.7	-1.68E-06	-0.99	-0.15
	2'447.30	1.30	4.06	7.50E-07	0.09	0.33

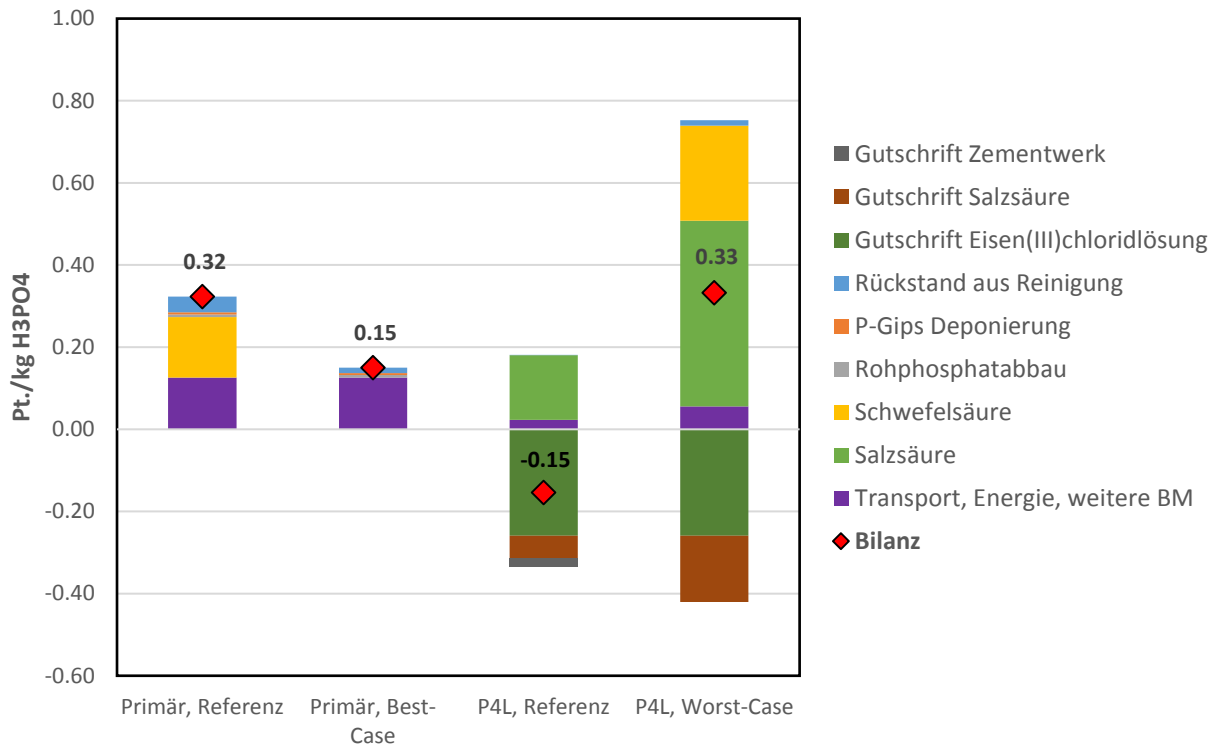


**Abbildung 5:** Resultate der Wirkungsabschätzung für die Primärproduktion und für das P4L-Verfahren grafisch dargestellt als Anteil des Referenzszenarios (Referenz Primärproduktion = +1, Referenz P4L-Verfahren = -1).

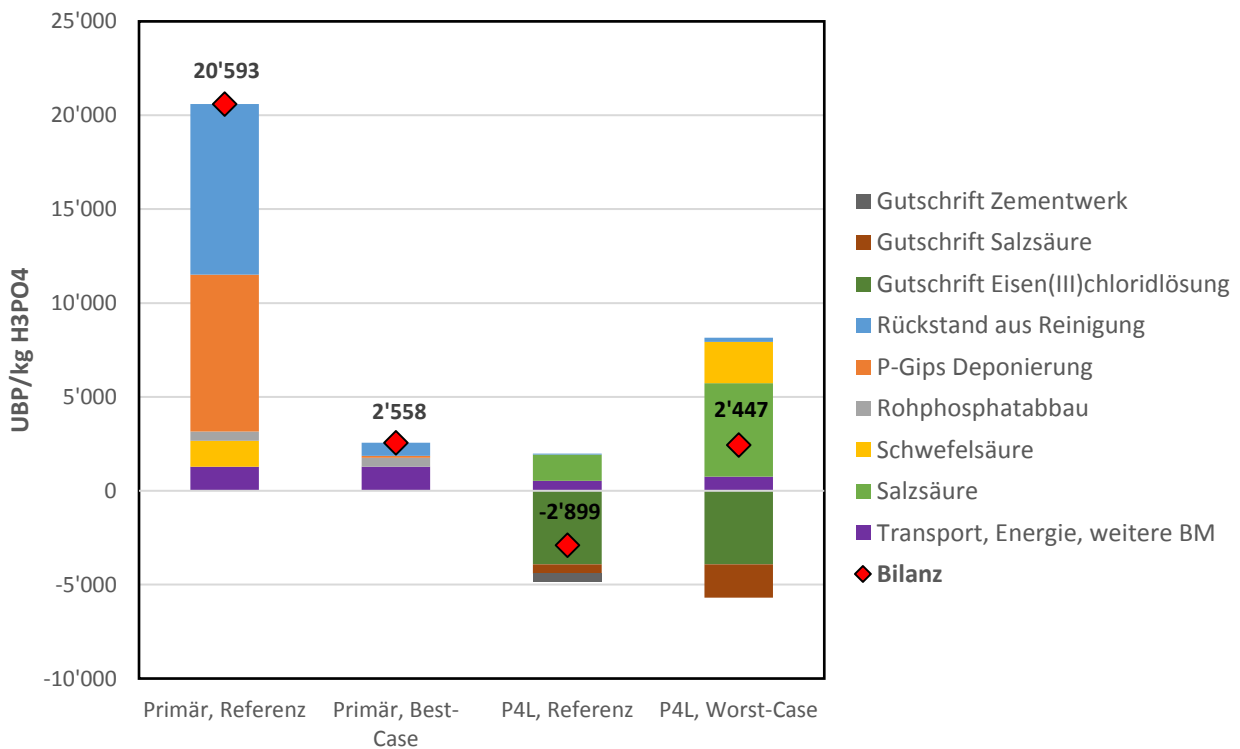
Beim P4L-Verfahren ist die Änderung bei ReCiPe und Klimawandel anteilmässig am grössten. Dies liegt daran, dass im Worst-Case-Szenario vorwiegend Betriebsmittel- und Energieaufwände verändert wurden, welche in diesen Methoden besonders stark gewichtet werden. Bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden sind die Umweltwirkungen des Worst-Case-Szenarios neu positiv d.h. die Gutschriften können die Aufwände nicht länger kompensieren. Dies liegt hauptsächlich an den Salzsäure-, Schwefelsäure- und Wärmearaufwänden, welche aufgrund der geänderten Herkunft nun deutlich grössere Umweltwirkungen nach sich ziehen. Die Deponierung des SM-Konzentrats auf der Reststoffdeponie spielt eine eher untergeordnete Rolle.

Vergleicht man das Best-Case-Szenario der Primärproduktion mit dem Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens, zeigt sich, dass die Primärproduktion bei fünf von sechs Wirkungsabschätzungsmethoden nach wie vor grössere Umweltwirkungen verursacht, lediglich bei ReCiPe resultieren für das P4L-Verfahren grössere Umweltwirkungen. In Abbildung 6 ist zu sehen, dass die Umweltwirkungen beim Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens auf der Seite der Aufwände bedeutend grösser sind als bei der Primärproduktion, insbesondere durch den Einsatz von mehrheitlich primärer Salz- und Schwefelsäure. Auch die Gutschriften können diese Aufwendungen nicht kompensieren. Im Gegensatz dazu verursacht die Primärproduktion in der UBP-Methode auch im Best-Case-Szenario grössere Umweltwirkungen im Vergleich zum P4L-Verfahren im Worst-Case-Szenario (+111 UBP/kg  $H_3PO_4$ , siehe Abbildung 7). Mitentscheidend ist die Gutschrift für die Eisen(III)chloridlösung, von welcher auch im Worst-Case davon ausgegangen wird, dass sie abgesetzt werden kann. Bei den anderen Wirkungsabschätzungsmethoden (siehe Abbildungen im Anhang 4) zeigt sich ein ähnliches Bild: die substituierte Eisen(III)chloridlösung sorgt für Gutschriften, welche einen Teil der höheren Aufwände im Worst-Case-Szenario kompensieren. Dazu kommen die Gutschriften für die co-produzierte Salzsäure.

Es soll hier noch einmal betont werden, dass es sich beim P4L-Verfahren um eine Technologie handelt, die noch nicht grosstechnisch eingesetzt wurde. Dementsprechend sind sowohl Menge als auch Bezugsort der Betriebsmittel mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Bei den Gutschriften durch die Nebenprodukte sind die Unsicherheiten ungleich grösser, da Absatzunsicherheiten zu den technischen Unsicherheiten dazukommen. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Sekundärproduktion mittels P4L-Verfahren selbst unter den unvorteilhaften Bedingungen des Worst-Case-Szenarios ökologisch sinnvoll ist im Vergleich zum Best-Case der Primärproduktion. Hauptbedingung dafür ist, dass die produzierte Eisen(III)chloridlösung auf dem Markt abgesetzt werden kann und dabei primäre Eisen(III)chloridlösung substituiert wird. Eisen(III)chloridlösung wird beispielsweise in Abwasserreinigungsanlagen als Fällmittel zur Phosphatelimination eingesetzt (Böhler et al. 2013). Des Weiteren zeigen die Resultate, dass die ökologische Bewertung der Betriebsmittel (Bezug, Substitution bzw. Allokationsverfahren) von mitentscheidender Bedeutung ist. Gerade in der ReCiPe-Methode wird deutlich, dass die hohen Betriebsmittelaufwände des P4L-Verfahrens ökologisch ins Gewicht fallen können.



**Abbildung 6:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: ReCiPe-Methode, Endpoint (H). Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).



**Abbildung 7:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: Methode der ökologischen Knappheit 2013 (UBP). Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).



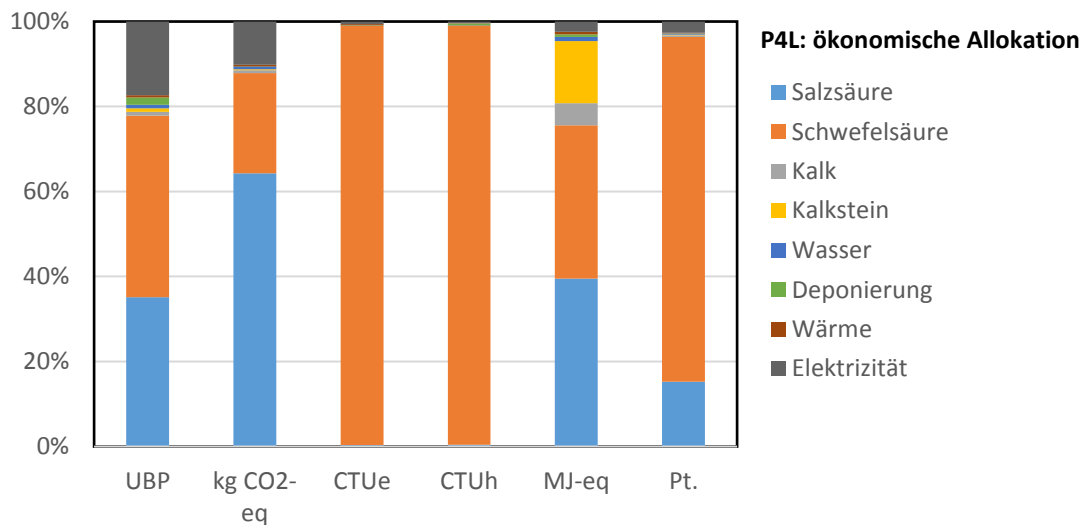
#### 4.2.1 Sensitivität ökonomische Allokation und cut-off

Wie erwähnt wurde für sämtliche Hintergrundprozesse die ecoinvent v3.3 *cut-off* Datenbank verwendet. Das *cut-off*-Systemmodell basiert auf der Idee, dass sekundäre Produkte von den Umweltwirkungen aus der vorangehenden Primärproduktion vollkommen befreit sind, d.h. zu Beginn des Recyclingprozesses *burden free* anfallen. Dies ist bei Prozessen relevant, welche mehrere Produkte erzeugen (sogenannte *multi-output*-Prozesse), wobei ein Hauptprodukt sowie Nebenprodukte erzeugt werden. In den beiden Referenzszenarien dieses Berichts wurden diese Nebenprodukte bzw. Inputs aus Nebenprodukten teilweise unterschiedlich behandelt (Schwefelsäure, Salzsäure, Eisen(III)chloridlösung). Aus Datenbank-Konsistenzgründen ist dies problematisch, allerdings bilden die im Rahmen dieser Studie angepassten Prozesse die für das P4L-Verfahren aktuellen Produktionsmärkte in Europa um einiges korrekter ab als die ecoinvent v3.3-Prozesse. Aus diesem Grund ist die Methodik der Referenzszenarien gerechtfertigt, trotzdem sollen hier zusätzlich zwei Allokationsverfahren auf die betroffenen Nebenprodukte angewendet werden (siehe Tabelle 7). Bei der ökonomischen Allokation werden Umweltwirkungen bei *multi-output*-Prozessen aufgrund des Produkterlöses aufgeteilt, *cut-off* bedeutet, dass Nebenprodukte weder Aufwände noch Gutschriften mit sich ziehen.

**Tabelle 7:** Übersicht der beiden angewandten Allokationsverfahren hinsichtlich der betroffenen Prozesse.

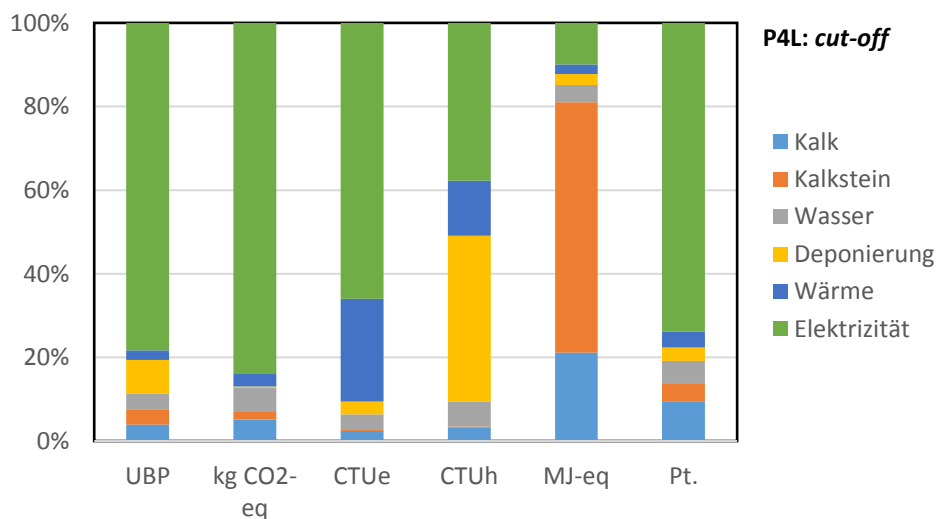
Prozess	ökonomische Allokation	cut-off
Salzsäure	Nebenprodukt der TDI-Herstellung (siehe Tabelle 23)	<i>burden free</i> (=weder Aufwand noch Gutschrift)
Schwefelsäure	Nebenprodukt der Kupferherstellung (siehe Tabelle 24)	<i>burden free</i> (= kein Aufwand)
Eisen(III)chloridlösung	Nebenprodukt des P4L-Prozesses (siehe Tabelle 25)	<i>burden free</i> (= keine Gutschrift)

Abbildung 3 zeigt die Wirkungsabschätzung des P4L-Verfahrens aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln bei ökonomischer Allokation der Nebenprodukte. Es ist gut zu sehen, dass der Salz- und Schwefelsäure auf diese Art bei allen Wirkungsabschätzungsmethoden ein Grossteil der Gesamtumweltwirkung des P4L-Verfahrens angerechnet wird. Dies rührt daher, dass die TDI- bzw. Kupferherstellung beträchtliche Umweltwirkungen nach sich ziehen (welche dann zu einem Teil den Nebenprodukten angerechnet werden). Während die totale Umweltwirkung des P4L-Verfahrens in der UBP-Methode deutlich tiefer ist im Vergleich zur Primärproduktion (-17'555 UBP), zeigt sich bei der ReCiPe-Methode das Gegenteil (+0.09 Pt.). Es soll hier gesagt sein, dass die betroffenen Primärprozesse in ecoinvent nicht genauer betrachtet oder angepasst wurden, und insbesondere im Falle der Kupferherstellung die aktuelle europäische Situation mangels besserer Datenlage nicht präzise abbilden.



**Abbildung 8:** Ökonomische Allokation von Nebenprodukten: Wirkungsabschätzung des P4L-Verfahrens aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln.

Abbildung 4 zeigt die Wirkungsabschätzung des P4L-Verfahrens aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln für den *cut-off*-Ansatz von Nebenprodukten. Da bei diesem Ansatz weder die Salz- noch die Schwefelsäure für Umweltwirkungen sorgen, sieht das Bild anders aus: die für den Prozess benötigte Elektrizität spielt bei fünf von sechs Wirkungsabschätzungsmethoden die Hauptrolle. Bei der Humantoxizität dominiert die Deponierung der Rückstände, bei der CE<sub>x</sub>D-Methode Kalkstein und Kalk. Dasselbe wie für die Salz- und Schwefelsäure gilt für die Eisen(III)chloridlösung: der P4L-Prozess erhält für die co-Produktion keine Gutschriften.



**Abbildung 9:** Keine Umweltwirkung von Nebenprodukten (*cut-off*): Wirkungsabschätzung des P4L-Verfahrens aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln.

Betrachtet man nun die Referenzszenarien sowie sämtliche angewandten Sensitivitätsanalysen in der Übersicht, zeigt sich folgendes Bild (siehe Tabelle 8): bei UBP, Klimawandel, Humantoxizität sowie der CE<sub>x</sub>D-Methode schneidet das P4L-Verfahren in sämtlichen betrachteten Fällen ökologisch besser ab als die Primärproduktion. Bezüglich Ökotoxizität ergibt sich das gleiche Bild zugunsten des P4L-Verfahrens mit Ausnahme der ökonomischen Allokation. Lediglich bei der ReCiPe-Methode ist die Primärproduktion ökologisch vorteilhaft, wenn für das P4L-Verfahren das Worst-Case-Szenario angenommen oder mit ökonomischer Allokation gerechnet wurde. Dies liegt an den hohen Umweltwirkungen der Salz- und Schwefelsäure bei der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe. Die absoluten Resultate der beiden Allokationsverfahren ökonomische Allokation und *cut-off* sind in Tabelle 28 im Anhang 4 zu finden.

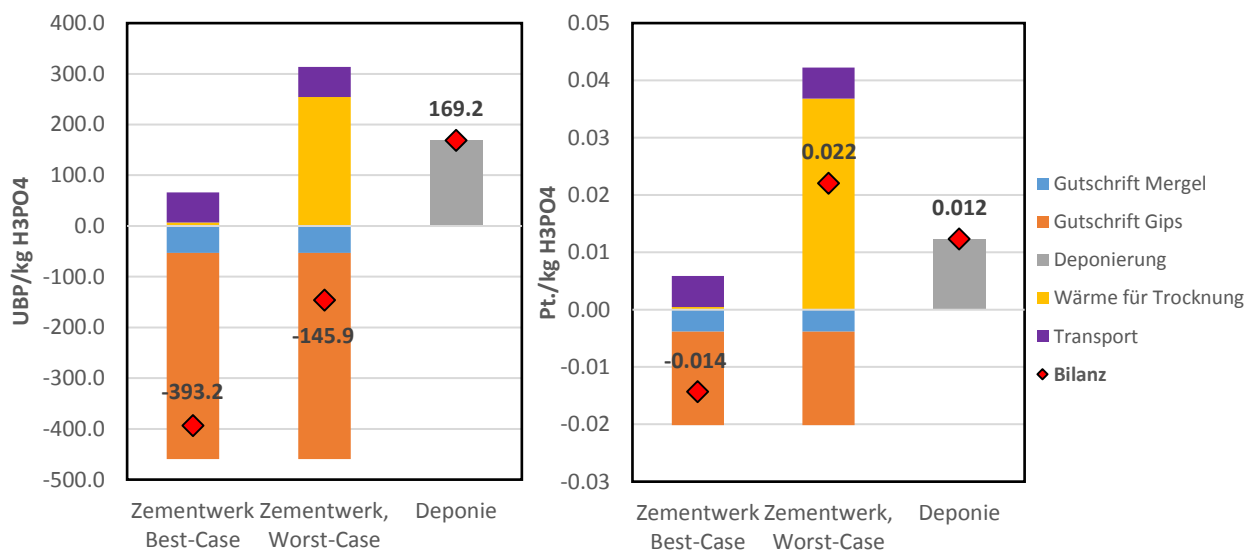
**Tabelle 8:** Netto-Umweltnutzen des P4L-Verfahrens im Vergleich zur Primärproduktion von P-Säure pro kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> für alle Sensitivitätsanalysen und Wirkungsabschätzungsmethoden. Grün hervorgehoben sind die Fälle, in denen das P4L-Verfahren besser abschneidet als die Primärproduktion (= positiver Netto-Umweltnutzen), rot hervorgehoben sind die Fälle, in denen die Primärproduktion besser abschneidet (=negativer Netto-Umweltnutzen).

Sensitivitätsanalyse		Netto-Umweltnutzen P4L-Verfahren [ /kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ]					
Primärproduktion	P4L-Verfahren	UBP [UBP]	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq]	ETP [CTUe]	HTP [CTUh]	CE <sub>x</sub> D [MJ-eq]	ReCiPe, total [Pt.]
Referenz-Szenario		23'491	2.72	88.28	3.02E-05	5.44	0.48
Best-Case-Szenario	Worst-Case-Szenario	111	0.15	4.94	5.49E-07	4.37	-0.18
Referenz-Szenario	Worst-Case-Szenario	18'145	0.42	65.49	2.78E-05	4.37	-8.71E-03
Best-Case-Szenario	Referenz-Szenario	5'457	2.46	27.74	2.98E-06	5.45	0.30
	Cut-off	18'632	1.13	61.81	2.79E-05	4.39	0.15
	Ökonomische Allokation	16'502	0.09	-22.64	2.10E-05	4.30	-0.09

## 4.2.2 Sensitivität Laugungsrückstand- und Gipsverwertung

In einer weiteren Sensitivitätsanalyse wurde für die UBP- und ReCiPe-Methode untersucht, ob die Trocknung und anschließende Verwertung von Laugungsrückstand und Gips im Zementwerk auch im Worst-Case-Szenario (Erdgas-Brenner für die Wärmeproduktion) ökologisch sinnvoll ist (siehe Abbildung 10). Für den Transport ins Zementwerk wurde dabei eine Distanz von 50km angenommen.

Bei der UBP-Methode überwiegen die Gutschriften von Gips und Mergel im Vergleich zu den Umweltwirkungen des Erdgas-Brenners und des Transports, womit die Verwertung im Zementwerk auch im Worst-Case eine Netto-Gutschrift erreicht. Bei der Deponierung fallen hingegen geringe Umweltwirkungen an, etwa zur Hälfte durch den Transport und die Deponieinfrastruktur. Bei der ReCiPe-Methode fallen die Umweltwirkungen des Wärmebedarfs der Trocknung hingegen stärker ins Gewicht: die Netto-Umweltwirkung ist höher als im Falle der Deponierung. Dies zeigt die Bedeutung von Standortsynergien für die Wärmeproduktion bzw. -nutzung. Unter der Bedingung, dass die Wärme von der KVA bezogen wird, macht die Verwertung der Rückstände im Zementwerk auf jeden Fall Sinn. Im Gesamtkontext sind die Umweltwirkungen der Verwertung von Laugungsrückstand und Gips eher unbedeutend, die Analyse soll viel eher die Bedeutung der Standortwahl für ökologische Überlegungen anhand eines Beispiels veranschaulichen.



**Abbildung 10:** Sensitivitätsanalyse zur Trocknung von Laugungsrückstand und Gips für die Verwertung im Zementwerk. Methode der ökologischen Knappheit 2013 (links) und ReCiPe-Methode (rechts). Bei der Wärme wurde zwischen KVA (Best-Case) und Erdgas-Brenner (Worst-Case) unterschieden. Falls die Rückstände nicht im Zementwerk verwertet werden, müssen sie auf einer Inertstoffdeponie deponiert werden.

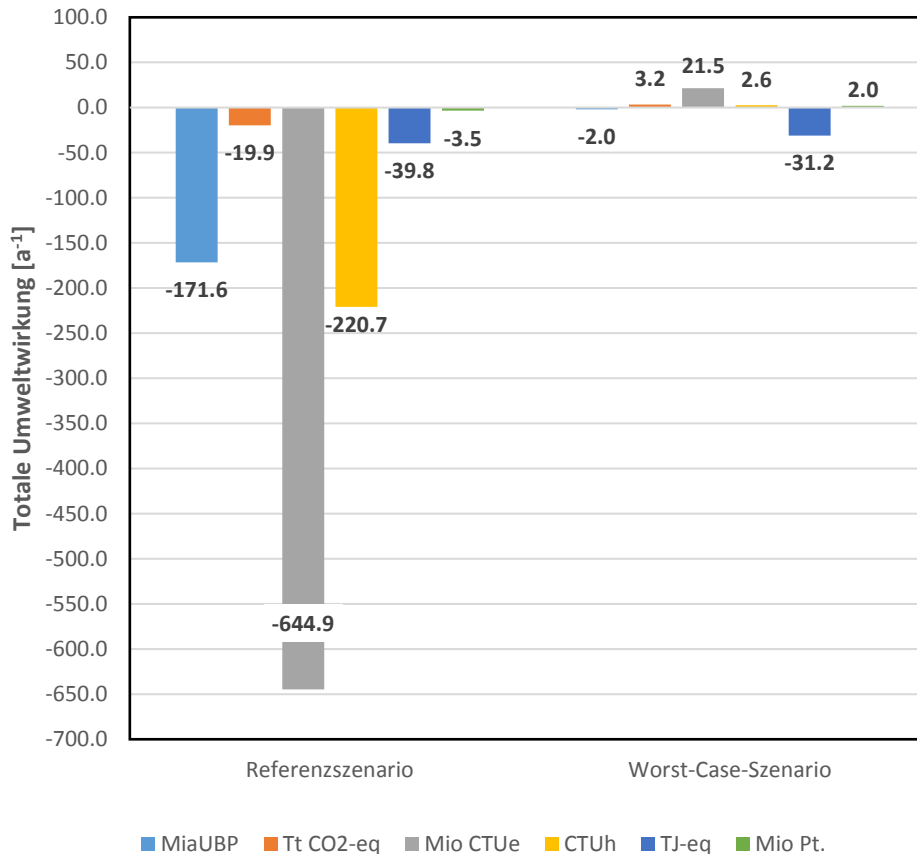
### 4.3 Einbettung in den Gesamtkontext

Die P-Rückgewinnung ist ein aktuelles Thema und entsprechend wird auch im Bereich Ökobilanzen vermehrt darauf geforscht (Remy & Jossa 2015, Remy & Kraus 2017). Ein zentrales Problem bisheriger Analysen ist die rasante technologische Entwicklung der P-Recyclingverfahren bei meist ungenügender oder unsicherer Datenlage: man läuft schnell Gefahr, Äpfel mit Birnen zu vergleichen, da die Datengrundlage der einzelnen Verfahren von einfachen Modellen über Pilotversuchsdaten bis hin zu Daten aus dem grosstechnischen Betrieb reichen. Remy & Jossa haben in einer Studie des europäischen P-REX-Forschungsprojekts verschiedene P-Recyclingverfahren mittels vergleichender Ökobilanz verglichen, und haben diese Problematik im Rahmen der Studie diskutiert. Es ist nur begrenzt möglich, die Resultate der Studie von Remy & Jossa mit den Resultaten dieser Studie zu vergleichen, da die funktionellen Einheiten und Systemgrenzen voneinander abweichen und die Datenlage nicht vergleichbar ist. Trotzdem soll der folgende Abschnitt aufzeigen, inwiefern die Erkenntnisse dieser Studie mit den Erkenntnissen von Remy & Jossa verknüpft werden können.

Die P-REX-Studie umfasst insgesamt zwölf P-Recyclingverfahren, darunter zwei Verfahren mit Säure-Aufschluss von KSA: LeachPhos (Produktion von Calciumphosphat) und Ecophos (Produktion von P-Säure). Die weiteren Verfahren decken die ganze verfahrenstechnische Bandbreite ab: Kristallisation aus KS bzw. Schlammwasser, Säure-Aufschluss von KS sowie thermochemischer Aufschluss aus KS und KSA, mit P-Rückgewinnungsgraden zwischen 4 und 98%. Die verschiedenen Ansetzungspunkte in der Abwasserbehandlungskette, sowie die sich stark unterscheidenden P-Rückgewinnungsgrade stellen eine weitere Herausforderung einer vergleichenden Ökobilanz dar, zumal bei den Verfahren eine grosse Palette an verschiedenen P-Produkten produziert wird. Die P-REX-Studie zeigte, dass sich die Verfahren nicht nur bezüglich P-Rückgewinnungsgrad sondern auch was die Umweltwirkungen angeht stark voneinander unterscheiden. Untersucht wurde die gesamte Abwasserbehandlungskette, wobei die P-Recyclingverfahren mit einem Referenzszenario konventioneller KS-Behandlung (KS-Faulung mit anschliessender KS-Verbrennung) verglichen wurden. Es wurde demnach analysiert, ob durch das P-Recycling ökologische Gutschriften entstehen durch die Substitution primärer P-Produkte und allfälliger Nebenprodukte. Auch dem mit dem P4L-Verfahren vergleichbaren Ecophos-Verfahren wurden demnach trotz nicht vergleichbarer Rahmenbedingungen (u.a. Schweizer Gesetzgebung) im Vergleich mit den anderen P-Recyclingverfahren „insgesamt tiefe Umweltwirkungen“ attestiert. In sämtlichen Wirkungskategorien werden durch die Substitution von Mineraldünger und weiteren Nebenprodukten im Vergleich zum Referenzszenario Gutschriften erzielt (-2.1 kt CO<sub>2</sub>-eq/a, -9.6 Mio CTU<sub>e</sub>/a, -8.5 CTU<sub>h</sub>/a).

Die vorliegende Studie bestätigt diese Erkenntnis. Abbildung 11 zeigt die jährliche Umweltwirkung des P4L-Verfahrens in Bezug auf sämtliche Wirkungsabschätzungsmethoden. Dabei ist die Gutschrift durch die Substitution primärer P-Säure nun mitberücksichtigt: im

Referenzszenario wird „Referenz“-Säure ersetzt (Zeile 1 in Tabelle 6), im Worst-Case-Szenario „Best-Case“-Säure (Zeile 2 in Tabelle 6). Die jährliche Umweltwirkung wurde aufgrund einer jährlichen KSA-Menge von 30'000 t/a quantifiziert. Die Umweltwirkungen aufgeschlüsselt nach Betriebsmittel (insbesondere um den Anteil der Gutschrift für die primäre P-Säure zu veranschaulichen) sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 im Anhang 5 illustriert.



**Abbildung 11:** Totale Umweltwirkung des P4L-Verfahrens (links: Referenzszenario, rechts: Worst-Case-Szenario) pro Jahr. Dabei mitberücksichtigt ist die Gutschrift für den Ersatz der primären P-Säure. Beim Referenzszenario ist die ersetzte P-Säure „Referenz“-Säure, beim Worst-Case-Szenario wird „Best-Case“-Säure ersetzt. Die Resultate aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln befinden sich im Anhang 4.

Unter der Bedingung, dass die P-Säure sowie die Nebenprodukte Eisen(III)chlorid und Salzsäure auf dem Markt abgesetzt werden, können durch das P4L-Verfahren bei sämtlichen Wirkungsabschätzungsmethoden beträchtliche Umweltwirkungen eingespart werden (siehe Referenzszenario in Abbildung 11). Die Wahl eines geschickten Standorts (Wärmemanagement, allenfalls Synergie mit dem SwissZinc-Prozess) kann aus ökologischer Sicht eine zusätzliche Rolle spielen. Im Worst-Case-Szenario resultieren hingegen lediglich bei UBP und CE<sub>x</sub>D Netto-Gutschriften, bei den anderen Wirkungsabschätzungsmethoden sorgt die geringere Gutschrift für die „Best-Case“-Säure für eine jährliche Netto-Umweltwirkung (siehe Worst-Case-Szenario in Abbildung 11).

## 4.4 Schlussfolgerungen

Zusammenfassend sollen folgende Punkte nochmals hervorgehoben werden:

- das P4L-Verfahren ist unter Schweizer Rahmenbedingungen und mit den Zielsetzungen im Entwicklungsprojekt in Bezug auf alle Wirkungsabschätzungsmethoden ökologisch deutlich vorteilhaft im Vergleich zur Primärproduktion von P-Säure. Selbst im Worst-Case-Szenario, d.h. unter der Annahme, dass Synergien und Nebenprodukt-/Rückstandsverwertung nicht wie geplant stattfinden, sind die Umweltwirkungen in allen Wirkungsabschätzungsmethoden bis auf Ökotoxizität tiefer als bei heutiger bzw. nach dem Best-Case zukünftig produzierter primärer P-Säure.
- die Umweltwirkung der Primärproduktion wird dominiert von direkten Emissionen durch verunreinigte Rückstände, hauptsächlich mit Uran und Schwermetallen verunreinigter P-Gips sowie schwermetallhaltige P-Säure aus der Reinigung (UBP, USEtox), sowie durch relativ hohe Betriebsmittel- und Energieaufwände entlang der Prozesskette (Klimawandel, ReCiPe). Die weiten Transportwege spielen nur eine geringfügige Rolle.
- die Umweltwirkung des P4L-Verfahrens wird dominiert von den Betriebsmitteln (Salz-, Schwefelsäure falls berücksichtigt) sowie von Gutschriften durch Nebenprodukte (Eisen-(III)chloridlösung, Salzsäure) und in geringerem Masse durch Rückstandsverwertungen. Zudem spielt insbesondere beim Wärmemanagement die Standortwahl (Synergie mit KVA) eine Rolle. Die ökologische Bewertung der oft als Nebenprodukte anfallenden Betriebsmittel ist dabei nicht trivial und beeinflusst die Ergebnisse in grossem Masse.
- diese Studie hat die Herausforderung eines Vergleichs von Verfahren, von welchen eines noch in der Entwicklung steckt, bestätigt: zu den grundsätzlichen Unsicherheiten der Prozessdaten kommen beim P4L-Verfahren Unsicherheiten bezüglich Absatz und Verwertung der Nebenprodukte und Rückstände hinzu. Diese Unsicherheiten wurden im Rahmen eines Worst-Case-Szenarios berücksichtigt.
- die Wahl der Wirkungsabschätzungsmethoden für den Bereich der P-Rückgewinnung hat sich als passend herausgestellt, um die verschiedenen Aspekte der P-Säure-Herstellung zu beleuchten, und sei hiermit für zukünftige Ökobilanzen im Bereich der P-Rückgewinnung empfohlen.
- für einen aufschlussreichen Vergleich verschiedener P-Rückgewinnungsverfahren ist eine umfassende und vergleichbare Datenlage (d.h. detaillierte Daten der Elemente aller In- und Outputstoffflüsse, Betriebsmittelaufwände, Energieverbrauch, sowie Rückstandsverwertung) aller Verfahren unabdingbar.

## 5. Referenzen

Agrimoney (2017). OCP faces cut in EU phosphoric acid prices, after India wins discount. <https://www.agrimoney.com/news/ocp-faces-cut-in-eu-phosphoric-acid-prices-after-india-wins-discount-36741> Zuletzt besucht: 17.02.2018

Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M. and Primas A. (2007). Life Cycle Inventories of Chemicals. ecoinvent report No. 8, v2.0. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Becker P. (1989) Phosphates and Phosphoric Acid. Raw Materials, Technology and Economics of the Wet Process. 2<sup>nd</sup> Edition. Marcel Dekker Inc., New York.

Böhler M., Heisele A., Haueter R., Rensch D., Sterkele B., Moser R., Morgenroth E. und Siegrist H., (2013). Machbarkeits- und Vergleichsstudie zur Umstellung der chemischen Phosphorelimination mittels Eisen- auf Aluminiumprodukte auf kommunalen Abwasserreinigungsanlagen, Schlussbericht der Eawag an das AWEL des Kanton Zürich, Dübendorf.

Bösch M., Hellweg S., Huijbregts M., Frischknecht R. (2006). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. The International Journal of Life Cycle Assessment.

Brinkmann T., Santonja G., Schorcht F., Roudier S., Sancho L. (2014). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control).

Cotto D. (2018). Persönliche Kommunikation.

De Ridder M., de Jong S., Polchar J., Lingemann S. (2012). Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market. The Hague Centre for Strategic Studies (HCSS).

ecoinvent (2017). The Ecoinvent Database v3.3. The ecoinvent Centre, Zurich, Switzerland. <http://www.ecoinvent.org>.

European Commission (2007). Reference Document on Best Available Techniques for the Manufacture of large volume inorganic chemicals – ammonia, acids and fertilisers. Integrated Pollution Prevention and Control, August 2007.

Frischknecht R., Steiner R. Jungbluth N. (2008). Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006. Öbu – Netzwerk für nachhaltiges Wachstum, Zürich, Schweiz.

Geissler B. (2017). E-Mail Kommunikation.

Gilmour R. (2013). Phosphoric Acid: Purification, Uses, Technology and Economics. CRC Press.



Goedkoop M., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J. van Zelm R. (2009). ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation.

Holleman A., Wiberg N. (2007). Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 102. Auflage. de Gruyter.

IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., Qin G., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

ISO 14040 (2006). Environmental management; Life cycle assessment, Life cycle impact assessment. International Organisation for Standardisation (ISO).

ISO 14044 (2006). Environmental management; Life cycle assessment, Requirements and guidelines. International Organisation for Standardisation (ISO).

LME (2017). London Metal Exchange. LME Copper. <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/Copper>, Zuletzt besucht: 18.12.2017.

Remy C. & Jossa P. (2015). Life Cycle Assessment of selected processes for P recovery from sewage sludge, sludge liquor, or ash. Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency. P-REX Project.

Remy C. & Kraus F. (2017). Life Cycle Assessment of processes for P recycling, In Ohtake, H. & Tsuneda, S. [eds.], Phosphorus Recovery and Recycling. Tokyo, Japan: Springer. In Print.

Rosenbaum R., Bachmann T., Gold L., Huijbregts M., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H., MacLeod M., Margni M., McKone T., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M. (2008). USEtox – The UNEP-SETAC toxicity model: Recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment 13(7): 532-546.

Schlumberger S., Haupt M., Jutz M. (2016). Zinkrecycling aus Hydroxidschlämmen. Abschlussbericht. Mitfinanziert durch das BAFU, Dezember 2016.

Syers J., Mackay A., Brown M., Currie L. (1986). Chemical and physical characteristics of phosphate rock materials of varying reactivity. Journal of the Science of Food and Agriculture, 37, 1057-1064.

Técnicas Reunidas (2018). Procedural market analysis for P-recovery from municipal waste water. Questionnaire for technology suppliers invited to hearings.

UN (2017). UN Comtrade Database. <https://comtrade.un.org/data> Zuletzt besucht: 15.02.2018

# Anhang

## Anhang 1 – Inventare Primärproduktion P-Säure

Ausgangspunkt für die Aufstellung der Inventare war der ecoinvent v3.3-Prozess

*market for phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state,*

welcher die ganze Prozesskette primärer P-Säure (inkl. Reinigung für industrielle Verwendungen) beinhaltet. Die vorhandenen Produktionsprozesse in Marokko (MA) und der USA (US) wurden um einen weiteren Datensatz Israel (IL) erweitert. BM wurden wo möglich und sinnvoll aufgrund der chemischen Zusammensetzung des P-Gesteins berechnet, die chemische Zusammensetzung des P-Gipses ebenfalls (siehe Tabelle 9 und Tabelle 10).

**Tabelle 9:** Chemische Zusammensetzung des aufbereiteten Rohphosphats.

[%]	MA (Khourigba)	US (Florida)	IL (Negev)	Quelle(n)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34.0	29.0	32.0	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
CaO	52.0	47.0	51.0	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
SiO <sub>2</sub>	2.4	3.7	1.6	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	1.1	0.2	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	1.1	0.1	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
MgO	0.2	0.3	0.2	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
CO <sub>2</sub>	4.2	5.6	6.0	Gilmour 2013 (MA, IL), Althaus et al. 2007 (US)
SO <sub>3</sub>	1.2	0.1	2.0	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
F	3.9	3.7	4.0	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
Na <sub>2</sub> O	1.2	0.5	0.6	Gilmour 2013 (MA, IL), EC 2007 (US)
K <sub>2</sub> O	0.8	0.1		Gilmour 2013 (MA), EC 2007 (US)
C	0.2	0.2		Gilmour 2013 (MA), EC 2007 (US)
[ppm]				
Cd	17.5	9.0	22.0	EC 2007, Althaus et al. 2007
Pb	10.0	17.0	5.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
As	13.0	11.0	7.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
Cr	200.0	60.0	230.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
Cu	40.0	13.0	12.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
Mn	21.0	211.0	2.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
Ni	35.0	28.0	90.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)
Zn	248.0	70.0	560.0	Althaus et al. 2007 (MA), EC 2007 (US), Syers et al. 1986 (IL)
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	185.0	101.0	153.0	EC 2007 (MA, US), Syers et al. 1986 (IL)

**Tabelle 10:** Chemische Zusammensetzung des P-Gipses, berechnet aufgrund der Zusammensetzung des aufbereiteten Rohphosphats (siehe Tabelle 9). TK = Transferkoeffizient in den P-Gips.

	TK	MA	US	IL	Quelle TK
	[%]	[kg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	[kg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	[kg/kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , as PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	4.0 <sup>1</sup>	0.0558	0.0854	0.0558	Althaus et al. 2007
CaO, as Ca <sup>++2</sup>	99.0	1.21	1.30	1.26	Althaus et al. 2007
SO <sub>3</sub> , as SO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	97.0	2.32	2.46	2.43	Althaus et al. 2007
F, as F <sup>-</sup>	43.0	0.0514	0.0584	0.0560	European Commission (EC) 2007
Cd	20.0	1.07E-05	6.60E-06	1.43E-05	Althaus et al. 2007
Pb	83.0	2.54E-05	5.18E-05	1.35E-05	Althaus et al. 2007
As	14.0	5.58E-06	5.65E-06	3.19E-06	Althaus et al. 2007
Cr	8.0	4.90E-05	1.76E-05	5.99E-05	Althaus et al. 2007
Cu	6.0	7.35E-06	2.86E-06	2.34E-06	Althaus et al. 2007
Mn	13.0	8.36E-06	1.01E-04	8.46E-07	Althaus et al. 2007
Ni	38.0	4.07E-05	3.90E-05	1.11E-04	Althaus et al. 2007
Zn	6.0	5.51E-05	1.54E-05	1.09E-04	Althaus et al. 2007
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , as U	18.0	1.02E-04	6.67E-05	8.96E-05	Althaus et al. 2007

<sup>1</sup> US: 6.0 (94% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Effizienz)

<sup>2</sup> 0.114 kg/kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> CaO aus Brandkalk mitberücksichtigt

<sup>3</sup> SO<sub>3</sub> aus Schwefelsäure mitberücksichtigt

**Tabelle 11:** Aufbereitung Rohphosphat: Inputs aus der Technosphäre. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007 und Gilmour 2013.

<b>Funktionelle Einheit</b>	<b>kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>					
Prozess	Einheit	Ort	MA	US	IL	Bemerkung
Aufbereitung			nass	nass	trocken	
phosphorus, in ground	kg	-	0.459	0.621	0.447	
phosphorus, 18% in apatite, x% in crude ore, in ground	kg	-	3.82	15.5	4.06	
fluorine, 4.5% in apatite, x% in crude ore, in ground	kg	-	0.121	0.156	0.132	
water, well, in ground	m3	-	8.53E-03	1.00E-02	3.90E-03	
market for diesel, burned in building machine	MJ	GLO	0.124	0.188	0.133	
market for heat, district or industrial, natural gas	MJ	RoW	0	0	0.296	50%
market for heat, district or industrial, other than natural gas	MJ	RoW	0	0	0.296	50%
market group for electricity, medium voltage	kWh	siehe Bem.	0.216	0.277	0.162	RAF (MA), US (US), RME (IL)
market for light fuel oil	kg	RoW	8.79E-03	1.03E-02	4.01E-03	
market for palm oil, crude	kg	GLO	5.89E-03	6.90E-03	2.69E-03	
market for soda ash, light, cryctalline, heptahydrate	kg	GLO	5.89E-03	6.90E-03	2.69E-03	
market for sodium silicate, spray powder 80%	kg	GLO	1.79E-03	2.10E-03	8.18E-04	
market for ethylenediamine	kg	GLO	2.39E-03	2.80E-03	1.09E-03	
sulfuric acid production*	kg	RoW	8.79E-03	1.03E-02	4.01E-03	Prozess adaptiert (*)

**Tabelle 12:** Aufbereitung Rohphosphat: Emissionen. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007.

Substanz	Einheit	MA	US	IL	Bemerkung
<b>Emissionen in die Luft</b>					
CO2	kg	0	0	2.05E-02	
HF	kg	0	0	1.22E-05	
U238, in dust	kBq	5.00E-03	5.86E-03	5.31E-03	
U234, in dust	kBq	5.00E-03	5.86E-03	5.31E-03	
Th230, in dust	kBq	5.00E-03	5.86E-03	5.31E-03	

Ra226, in dust	kBq	5.00E-03	5.86E-03	5.31E-03
Pb210, in dust	kBq	2.00E-03	2.34E-03	2.13E-03
Po210, in dust	kBq	2.00E-03	2.34E-03	2.13E-03
Th232, in dust	kBq	8.82E-05	1.03E-04	9.38E-05
particulates, >10um, total	kg	1.71E-03	2.00E-03	1.81E-03
particulates, 2.5-10um, total	kg	8.82E-04	1.03E-03	9.38E-04
particulates, <2.5um, total	kg	3.53E-04	4.14E-04	4.13E-04
heat, waste	MJ	0.853	1.00	0.906
<b>Emissionen in die Gewässer</b>				
F	kg	3.82E-05	4.48E-05	1.75E-05
SO4	kg	2.52E-03	2.96E-03	1.15E-03
toluene	kg	4.59E-07	5.38E-07	2.10E-07
N	kg	2.99E-05	3.50E-05	1.36E-05
P	kg	7.65E-05	8.97E-05	3.50E-05
suspended solids, unspecified	kg	1.91E-04	2.24E-04	8.73E-05
BOD	kg	5.70E-04	6.68E-04	2.60E-04
COD	kg	5.70E-04	6.68E-04	2.60E-04
DOC	kg	4.21E-07	4.93E-07	1.92E-07
TOC	kg	1.53E-04	1.79E-04	6.98E-05
radioactive species, alpha emitters	kBq	3.69E-03	4.33E-03	1.69E-03
<b>Emissionen in den Boden</b>				
oils, unspecified	kg	4.35E-03	5.10E-03	1.99E-03

**Tabelle 13:** P-Säure Produktion: Inputs aus der Technosphäre. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007 und Gilmour 2013.

<b>Funktionelle Einheit</b>	<b>kg H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>					
Prozess	Einheit	Ort	MA	US	IL	Bemerkung
market for phosphate rock, as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , beneficiated*	kg	MA/US/IL	0.740	0.754	0.740	Prozess adaptiert (*); wet (MA, US), dry (IL)
sulfuric acid production*	kg	RoW	1.99	2.14	2.05	Prozess adaptiert (*)
water, well, in ground	kg	-	3.83	4.01	3.92	
water, cooling, unspecified natural origin	kg	-	50.5	0	50.5	
market for quicklime, milled, loose	kg	RoW	0.0811	0.0811	0.0811	
market group for electricity, medium voltage	kWh	siehe Bem.	0.125	0.125	0.125	RAF (MA), US (US), RME (IL)
market for heat, district or industrial, natural gas	MJ	RoW	2.91	2.87	2.90	97%
market for heat, district or industrial, other than natural gas	MJ	RoW	0.0901	0.0889	0.0896	3%
market for phosphoric acid factory, fertilizer grade	unit	GLO	2.96E-10	2.96E-10	2.96E-10	von ecoinvent übernommen

**Tabelle 14:** P-Säure Produktion: Emissionen. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007 und eigenen Berechnungen.

Substanz	Einheit	MA	US	IL	Bemerkung
Emissionen in die Luft					
CO <sub>2</sub>	kg	0	0	0.123	
HF	kg	4.91E-05	5.19E-05	5.19E-05	
SiF <sub>4</sub>	kg	0	3.54E-06	3.54E-06	
particulates, >10um, total	kg	1.49E-04	1.49E-04	1.49E-04	
particulates, 2.5-10um, total	kg	1.66E-04	1.66E-04	1.66E-04	
particulates, <2.5um, total	kg	1.11E-04	1.11E-04	1.11E-04	
U238	kBq	2.42E-04	2.42E-04	2.42E-04	
Th228	kBq	6.91E-06	6.91E-06	6.91E-06	
Ra226	kBq	3.11E-04	3.11E-04	3.11E-04	
Ra222	kBq	2.84	2.84	2.84	
Pb210	kBq	2.77E-04	2.77E-04	2.77E-04	

Po210	kBq	4.84E-04	4.84E-04	4.84E-04	
K40	kBq	2.77E-05	2.77E-05	2.77E-05	
<b>Emissionen in die Gewässer</b>					
Substanzen P-Gips (siehe Tabelle 10)	%	100	0.006	0.001	Kurzzeit-Emission
	%		49	7	Langzeit-Emission
U238	kBq	1.16	5.79E-04	5.79E-04	Kurzzeit-Emission (in der Folge analog)
	kBq		1.16	1.16	Langzeit-Emission (in der Folge analog)
Th228	kBq	0.0277	1.38E-05	1.38E-05	
	kBq		0.0277	0.0277	
Ra226	kBq	2.54	1.27E-03	1.27E-03	
	kBq		2.54	2.54	
Pb210	kBq	2.26	1.13E-03	1.13E-03	
	kBq		2.26	2.26	
Po210	kBq	3.45	1.72E-03	1.72E-03	
	kBq		3.45	3.45	
K40	kBq	0.273	1.36E-04	1.36E-04	
	kBq		0.273	0.273	

**Tabelle 15:** P-Säure Reinigung: Inputs aus der Technosphäre. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007 und Gilmour 2013.

Funktionelle Einheit	kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>			
Prozess	Einheit	Ort		Bemerkung
market for phosphoric acid, fertilizer grade*	kg	GLO	1.03	Prozess adaptiert (*)
market for sulfuric acid*	kg	GLO	0.130	Prozess adaptiert (*)
market for isopropanol	kg	GLO	3.62E-04	
market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	kg	GLO	0.0261	
market for quicklime, milled, loose	kg	RoW	0.108	
water, well, in ground	m3	-	0.724	
water, cooling, unspecified natural origin	m3	-	14.5	
treatment of H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> purification residue*	kg	GLO	0.352	Prozess adaptiert (*)
market group for electricity, medium voltage	kWh	RAF	0.0760	70%, eigene Annahme
market group for electricity, medium voltage	kWh	FRCC	5.43E-03	5%, eigene Annahme
market group for electricity, medium voltage	kWh	RER	0.0272	25%, eigene Annahme
market group for heat, district or industrial, natural gas	MJ	RER	6.76	97%
market group for heat, district or industrial, other than natural gas	MJ	RER	0.209	3%
market for spent solvent mixture	kg	EwS <sup>1</sup>	-1.45E-03	20%
market for spent solvent mixture	kg	RoW	-5.79E-03	80%
market for water, deionised, from tap water, at user	kg	EwS	1.089	von ecoinvent übernommen
market for water, deionised, from tap water, at user	kg	CH	1.12E-03	von ecoinvent übernommen
market for chemical factory, organics	unit	GLO	4.70E-10	von ecoinvent übernommen

<sup>1</sup> Europe without Switzerland

**Tabelle 16:** P-Säure Reinigung: Emissionen. Berechnet aufgrund von Althaus et al. 2007.

Substanz	Einheit		Bemerkung
<b>Emissionen in die Gewässer</b>			
sodium, ion	kg	1.67E-03	
fluoride	kg	1.38E-03	



## Anhang 2 – Inventare P4L-Verfahren

**Tabelle 17:** P-Säure Produktion mittels P4L-Prozess. Inputs aus der Technosphäre. Berechnet aufgrund von TR 2018.

Funktionelle Einheit	kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>			
ecoinvent-Prozess	Einheit	Ort		Bemerkung
market for iron (III) chloride, without water, in 40% solution state	kg	CH	-3.63	Nebenprodukt
market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	RER	-2.06	Nebenprodukt; Anpassung aufgrund HCl-Gehalt
market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	RER	5.74	Anpassung aufgrund HCl-Gehalt
sulfuric acid production*	kg	RER	3.57	Grundannahme: <i>burden free</i>
market for lime, packed*	kg	CH	0.534	Prozess adaptiert (*)
market for limestone, crushed, for mill	kg	CH	1.64	
market for leaching residue, from phosphoric acid production*	kg	CH	-5.20	selbst gebauter Prozess
market for waste gypsum, from phosphoric acid production*	kg	CH	-1.58	selbst gebauter Prozess
heavy metal concentrate, from phosphoric acid production*	kg	CH	-0.0671	selbst gebauter Prozess
market for water, deionised, from tap water, at user	kg	CH	14.37	
market for tap water	kg	CH	14.78	
heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	12.1	P4L-Prozess
heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	11.5	Trocknung Laugungsrückstand
heat, from municipal waste incineration to generic market for heat district or industrial, other than natural gas	MJ	CH	1.71	Trocknung Gips
market for electricity, medium voltage	kWh	CH	1.77	

**Tabelle 18:** Massenbilanz des P4L-Prozesses. Als Input wurde ein KSA-Durchsatz von 30'000 t/a verwendet.

	Input KSA	Chemikalien					Produkte			Rückstände			Abfluss			
		HCl (33%)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%)	Kalk	Kalk- stein	Wasser	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (75%)	FeCl <sub>3</sub> (40%)	HCl (17%)	Laugungs- rückstand	Weisser Gips	SM- Konzentrat	Wasser verdampft	Abwasser		
Durchsatz [t/a]	30'000	38'100	26'100	3'900	12'000	254'000 <sup>1</sup>	9'740	26'500	26'500	69'055	16'500	700	143'000 <sup>1</sup>	63'000 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> m <sup>3</sup> /a	
Durchsatz [t TS/a]	30'000	0	0	3'900	12'000	0				38'000	11'550	490	0	0		
Trockensubst. [% TS]	100	0	0	100	100	0				55	70	70	0	0		
[ppm]															[mg/l]	
Sb	10						N/A	N/A	N/A	1.5	N/A	N/A			N/A	
As	20						15	<1	<1	1.8	5	714			N/A	
Pb	100						<1	<1	<1	65	7	920			<0.5	
Cd	2						<1	<1	<1	0.6	0.1	75			<0.1	
Ca	125'000						N/A	N/A	N/A	185'555	208'000	306'100			700	
Cl	200						N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			95	
Cr	95						<1	<1	<1	22	22	3'670			N/A	
Cr VI	0.01						N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			N/A	
Co	25						N/A	N/A	N/A	2.1	18	920			N/A	
Fe	170'000						<1	198'000	200	40'000	95	205			<5	
Cu	850						9	<5	<1	29	111	46'940			<0.5	
Mg	15'500						N/A	N/A	N/A	294	N/A	261'894 <sup>2</sup>			5'167 <sup>2</sup>	
Ni	70						<1	<1	<1	12	37	2'450			N/A	
P	81'000						375'000 <sup>3</sup>	100	100	2'180	2'100	0			N/A	<sup>3</sup> mg/l
Hg	0.1						<1	<1	<1	0.5	N/A	N/A			N/A	
S	9'200						67	N/A	N/A	158'000	200'000	N/A			<650	
Si	100'000						N/A	N/A	N/A	78'947 <sup>4</sup>	N/A	N/A			N/A	
Tl	0.4						N/A	N/A	N/A	0.5	N/A	N/A			N/A	
U	6						N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A			N/A	
Zn	2'100						9	<50	<50	94	355	108'200			<2	
Sn	60						N/A	N/A	N/A	7.1	60	1'700			N/A	

<sup>2, 4</sup> berechnet aufgrund Transferkoeffizienten gemäss S. Schlumberger (Mg: 70% Abwasser, 30% SM-Konzentrat; Si: 100% Laugungsrückstand)

**Tabelle 19:** ecoinvent v3.3-Prozesse und Annahmen zur Schwefelsäureherstellung, die im Rahmen der Sachbilanz dieser Studie eine Rolle gespielt haben.

Prozess	Einheit	Ort	Bemerkung
sulfuric acid production*	kg	RoW/ RER	<p>Primärproduktion aus Elementarschwefel: dieser Prozess wurde mit dem Faktor (1/0.65) multipliziert, da im Prozess ein Anteil von 35% Prozent als <i>burden free</i> angenommen wird, was für die Primärproduktion der Schwefelsäure nicht zutrifft (siehe Althaus et al. 2007)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ dieser Prozess wurde für die Primärproduktion der P-Säure (RoW), sowie (mangels passenderer Daten) für das Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens (RER) verwendet</li> </ul>
<i>burden free</i>	-	-	<p>Laut Aussagen eines europäischen Kupferproduzenten haben die zunehmenden Vorschriften bzgl. Rauchgasreinigung dazu geführt, dass Schwefelsäure bei der Kupferproduktion heutzutage nahezu ohne weiteren Aufwände «mitproduziert» wird (Aurubis 2018). Der betreffende Kupferprozess ist in ecoinvent v3.3 jedoch nicht als Multi-Output-Prozess modelliert, was eine Allokation der Umweltwirkung verunmöglicht (siehe unten). Somit wurde die Schwefelsäure aus der Kupferindustrie, basierend auf obiger Aussage, als <i>burden free</i> angenommen.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ diese Annahme wurde für das Referenzszenario des P4L-Verfahrens verwendet</li> </ul>
copper production, solvent-extraction electro-winning	kg	GLO	<p>Kupferherstellungsprozess mittels Solventextraktion und anschliessender Elektrolyse, bei dem die Schwefelsäure als Nebenprodukt anfällt; Allokation der Umweltwirkung mittels ökonomischer Allokation (siehe Tabelle 24).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ dieser Prozess wurde lediglich bei der Analyse mittels konsequenter ökonomischer Allokation verwendet, da er nicht die Kupfer- bzw. Schwefelsäureherstellung der potenziellen Anbieter in Europa beschreibt</li> </ul>
copper production, primary	kg	RER	<p>Kupferherstellung mittels pyrometallurgischem Prozess, bei welchem Schwefelsäure als Nebenprodukt der Rauchgasreinigung anfällt: dieser Prozess beschreibt die heutzutage übliche Kupferherstellung in europäischen Kupferhütten (z.B. Aurubis), ist jedoch stark veraltet (insbesondere was die Rauchgasreinigung betrifft); als Folge davon ist Schwefelsäure bei diesem Prozess nicht als Nebenprodukt modelliert</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ dieser Prozess kann für die Schwefelsäure nicht verwendet werden bzw. müsste zuerst umfassend angepasst werden</li> </ul>

**Tabelle 20:** ecoinvent v3.3-Prozesse und Annahmen zur Salzsäureherstellung, die im Rahmen der Sachbilanz dieser Studie eine Rolle gespielt haben.

Prozess	Einheit	Ort	Bemerkung
market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	kg	RER	Europäischer Marktprozess der Salzsäure (46% als Nebenprodukt der Allyl-Produktion, 27% Direktsynthese, 27% Mannheimer Prozess), welcher allerdings die aktuelle Marktsituation nur unzureichend abbildet, da Salzsäure zunehmend als Nebenprodukt gewonnen wird (Holleman & Wiberg 2007) ➤ dieser Prozess wurde im Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens verwendet
toluene diisocyanate production	kg	RER	Toluol-2,4-diisocyanat (TDI)-Produktionsprozess, bei welchem Salzsäure in grossen Mengen als Nebenprodukt anfällt; der Prozess ist in ecoinvent v3.3 ohne Salzsäure als Nebenprodukt modelliert, der ecoinvent-Report (Althaus et al. 2007) liefert jedoch Marktpreise beider Produkte für eine ökonomische Allokation (siehe Tabelle 23) ➤ dieser Prozess wurde im Referenz-Szenario des P4L-Verfahrens sowie bei der Analyse mittels konsequenter ökonomischer Allokation verwendet (Annahme: 1kg Salzsäure pro kg TDI, siehe Tabelle 23)

**Tabelle 21:** ecoinvent v3.3-Prozesse und Annahmen zur Herstellung der Eisen(III)chloridlösung, die im Rahmen der Sachbilanz dieser Studie eine Rolle gespielt haben.

Prozess	Einheit	Ort	Bemerkung
market for iron (III) chloride, without water, in 40% solution state	kg	GLO	Globaler Marktprozess der Eisen(III)chlorid-Herstellung (99.2% RoW und 0.8% CH) ➤ dieser Prozess wurde nicht verwendet, da er die Marktsituation in der Schweiz/in Europa nicht repräsentiert
market for iron (III) chloride, without water, in 40% solution state*	kg	CH	Adaptierter globaler Marktprozess auf die Schweiz (100% CH), welche als repräsentativ für die europäische Produktion angenommen wurde; die Marktanteile der Chlorproduktion mittels Chlor-Alkali Elektrolyse wurden aufgrund neuer BVT-Bestimmungen der EU angepasst, welche ein Verbot des Amalgam-Verfahrens ab 2017 vorsehen (Brinkmann et al. 2014, siehe Tabelle 22 für Anpassungen) ➤ dieser Prozess wurde sowohl für das Referenz- als auch für das Worst-Case-Szenario des P4L-Verfahrens verwendet, eine detailliertere Analyse des Produktionsprozesses wäre für weitere Analysen erwünscht.

**Tabelle 22:** Marktanteile der Chlor-Alkali Elektrolyse gemäss den neuen BVT-Bestimmungen der EU.

Chlor-Alkali Elektrolyseverfahren	Anteil in ecoinvent v3.3 (%)	Anteil in dieser Analyse (%)	Bemerkung
Amalgam (Quecksilber)	46	0	müssen ab 2017 stillgelegt oder auf Membranverfahren umgerüstet werden (Brinkmann et al. 2014)
Diaphragma	14	0	
Membran	40	100	BVT laut Brinkmann et al. 2014

**Tabelle 23:** Preisangaben für die ökonomische Allokation der Salzsäure (Allokation anhand der Einnahmen).

Produkt	Preis ab Werk (€/t)	Menge (t)	Einnahmen (€)	Allokationsfaktor (-)	Quelle
TDI	2'100	1	2'100	0.964	Althaus et al. 2007
Salzsäure	79.2	1 <sup>1</sup>	79.2	0.036	Althaus et al. 2007

<sup>1</sup> Annahme (dieser Wert liegt zwischen dem Literaturwert und dem stöchiometrischen „Theoriewert“)

**Tabelle 24:** Preisangaben für die ökonomische Allokation der Schwefelsäure (Allokation anhand der Einnahmen).

Produkt	Preis ab Werk (€/t)	Menge (t)	Einnahmen (€)	Allokationsfaktor (-)	Quelle
Kupfer	5'172	1	5'172	0.985	LME 2017, Althaus et al. 2007
Schwefelsäure	45.0	1.7	76.5	0.015	Aurubis 2018, Althaus et al. 2007

**Tabelle 25:** Preisangaben für die ökonomische Allokation der Eisen(III)chloridlösung (Allokation anhand der Einnahmen).

Produkt	Einnahmen (CHF)	Allokationsfaktor (-)	Quelle
P-Säure	227	0.290	Técnicas Reunidas 2018
Eisen(III)chloridlösung	74.0	0.095	Técnicas Reunidas 2018
Erlös für KS-Entsorgung	481	0.615	Técnicas Reunidas 2018

**Tabelle 26:** Annahmen zur Substitution von Gips und Laugungsrückstand im Zementwerk.

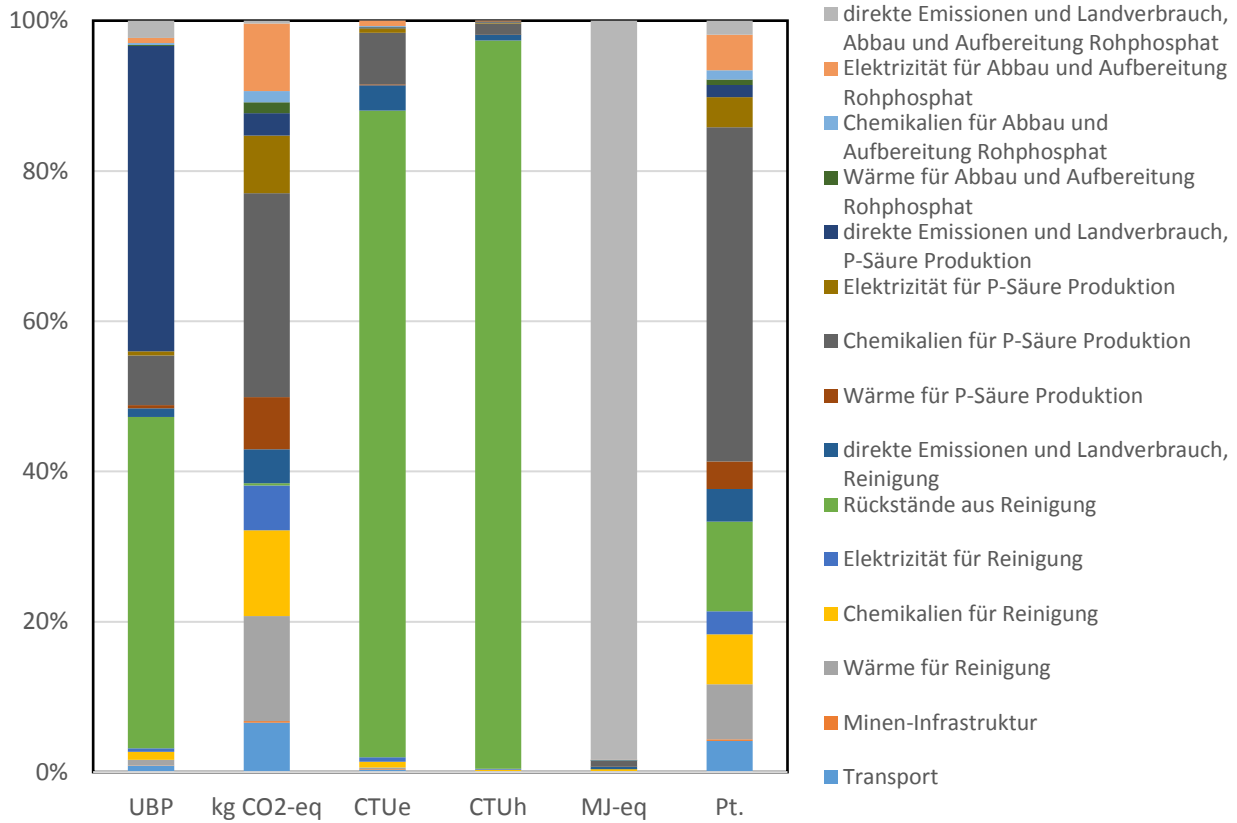
Rückstand	Substitution	Anteil (%)	ecoinvent-Prozess	Bemerkung
Laugungsrückstand	Mergel	60	market for calcareous marl (CH)	Anteil Mergel: Si, Al-Anteil im Laugungsrückstand; Transport (50km, Lastwagen) hinzugefügt
	Gips	40	market for gypsum, mineral (GLO)	
weisser Gips	Gips	100	market for gypsum, mineral (GLO)	Transport (50km, Lastwagen) hinzugefügt

**Tabelle 27:** Berechnung des Wärmebedarfs zur Trocknung von Laugungsrückstand und Gips. Für die Trocknung wurde eine Erwärmung des Wassers von 20°C auf 100°C und anschließende Verdampfung angenommen (Spezifische Wärmekapazität Wasser: 0.004187 MJ/(kg\*K), Verdampfungsenthalpie Wasser: 2.257 MJ/kg, thermischer Wirkungsgrad: 90%).

Rückstand	TS <sup>1</sup> vor Trocknung (%TS)	TS nach Trocknung (%TS)	Menge (t/a)	Wasser entfernt (t/a)	Wärmebedarf Trocknung (GJ/t)	Wärmebedarf Trocknung (GJ/a)
Laugungsrückstand	55	95	69'055	29'076	1.21	83'737
weisser Gips	70	95	16'500	4'342	0.76	12'505

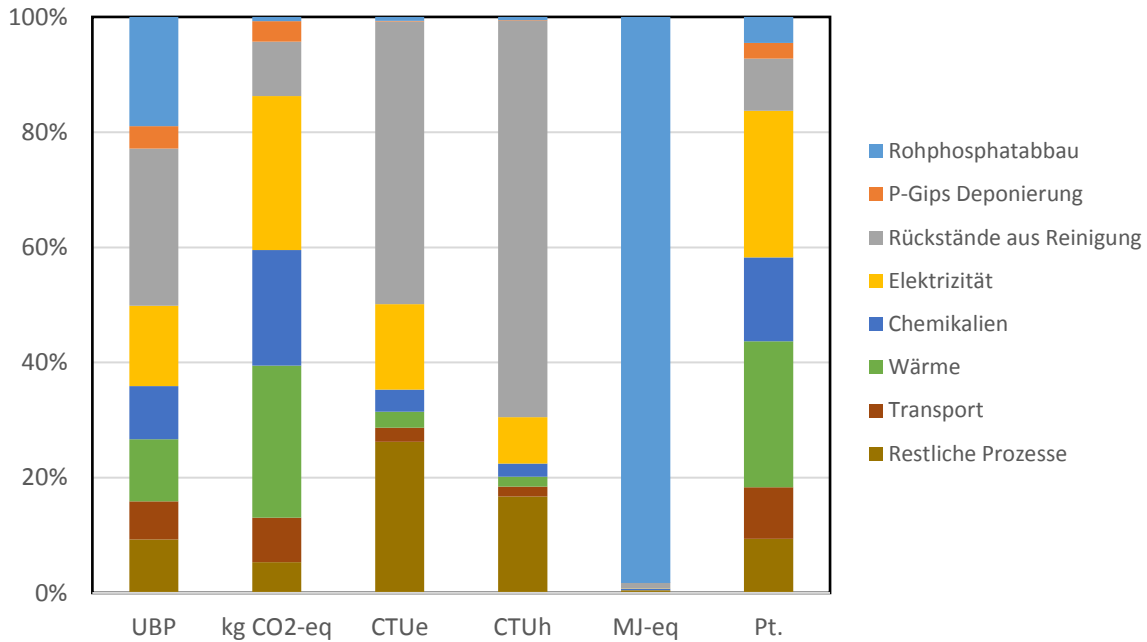
<sup>1</sup> TS=Trockensubstanz

### Anhang 3 – Resultate Primärproduktion P-Säure

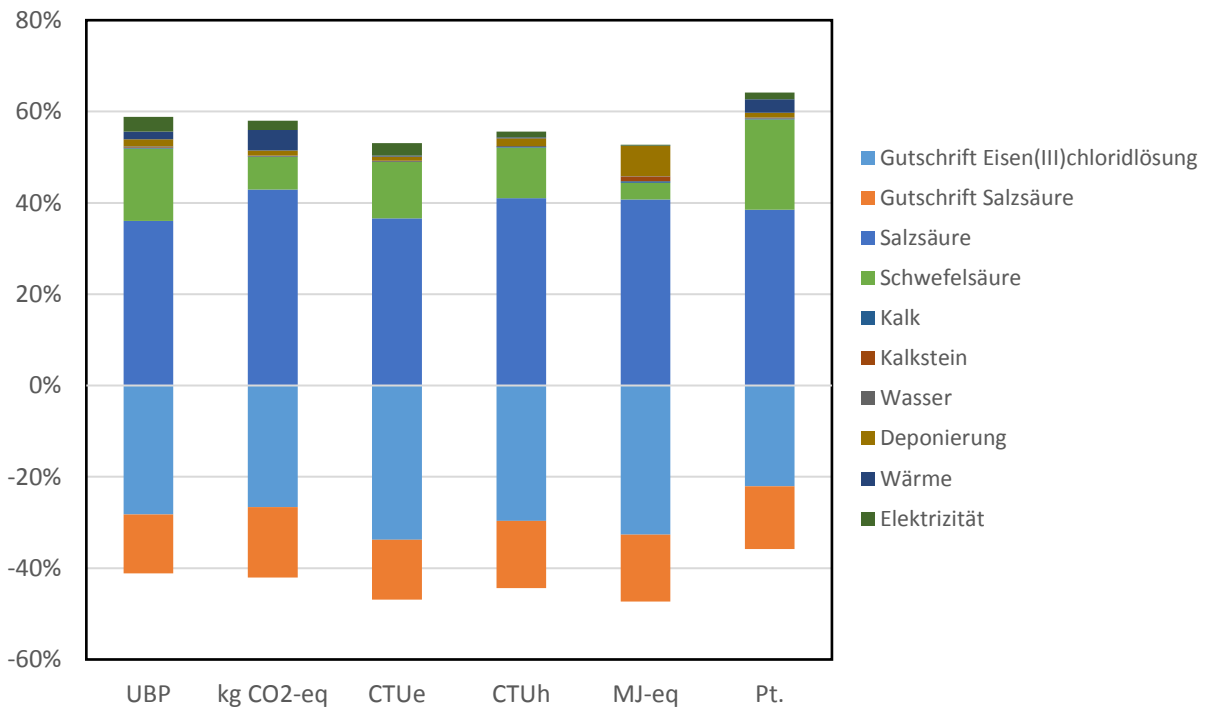


**Abbildung 12:** Referenzszenario Primärproduktion: Wirkungsabschätzung aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln und Prozessstufen. „Direkte Emissionen und Landverbrauch“ beinhaltet alle direkten Biosphärenflüsse (=Emissionen) der Prozessschritte, welche nicht indirekt durch inventarisierte (Input-)Prozesse verursacht werden (z.B. die Emissionen der Verunreinigungen im P-Gips ins Meer bzw. Grundwasser), sowie sämtliche Land- und Ressourcenverbräuche. „Rückstände aus Reinigung“ beinhaltet die Verunreinigungen, welche in die Rückstandssäure gelangen.

## Anhang 4 – Resultate Sensitivitätsanalyse

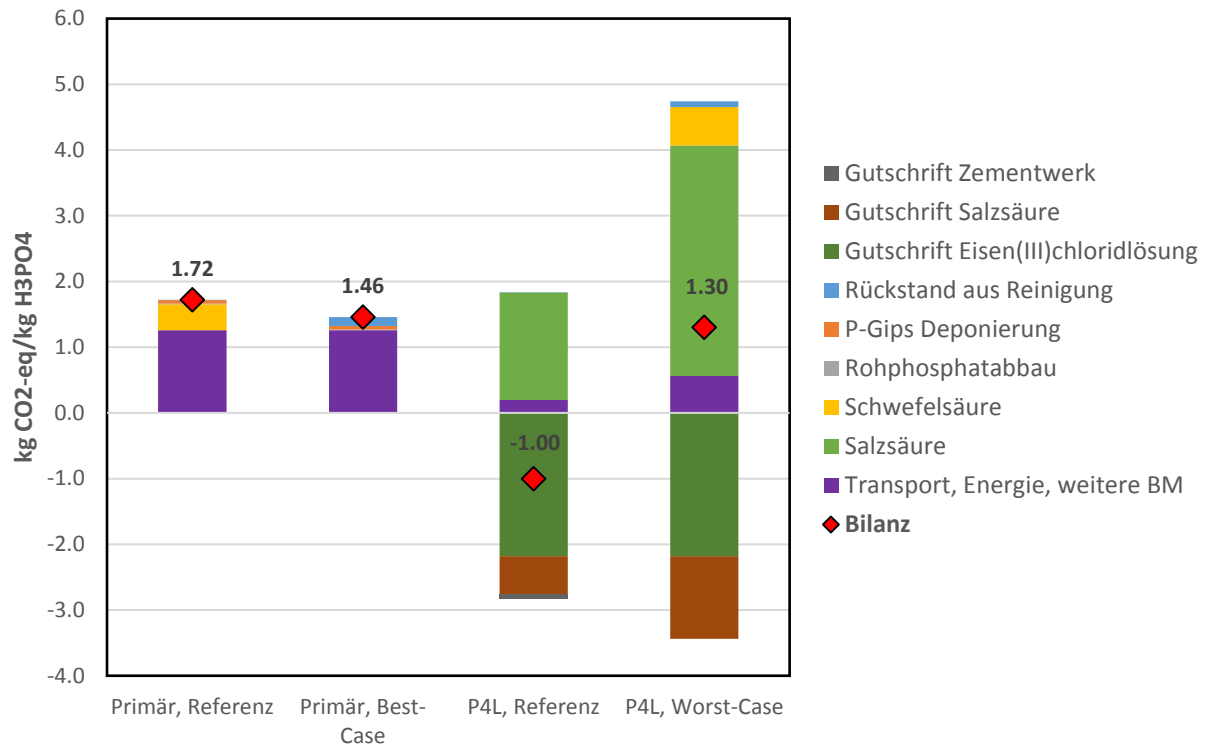


**Abbildung 13:** Best-Case-Szenario Primärproduktion: Wirkungsabschätzung aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln und Prozessstufen. „Restliche Prozesse“ beinhaltet alle weiteren direkten Emissionen der Prozessschritte. „Rückstände aus Reinigung“ beinhaltet die Verunreinigungen, welche in die Rückstandssäure gelangen.

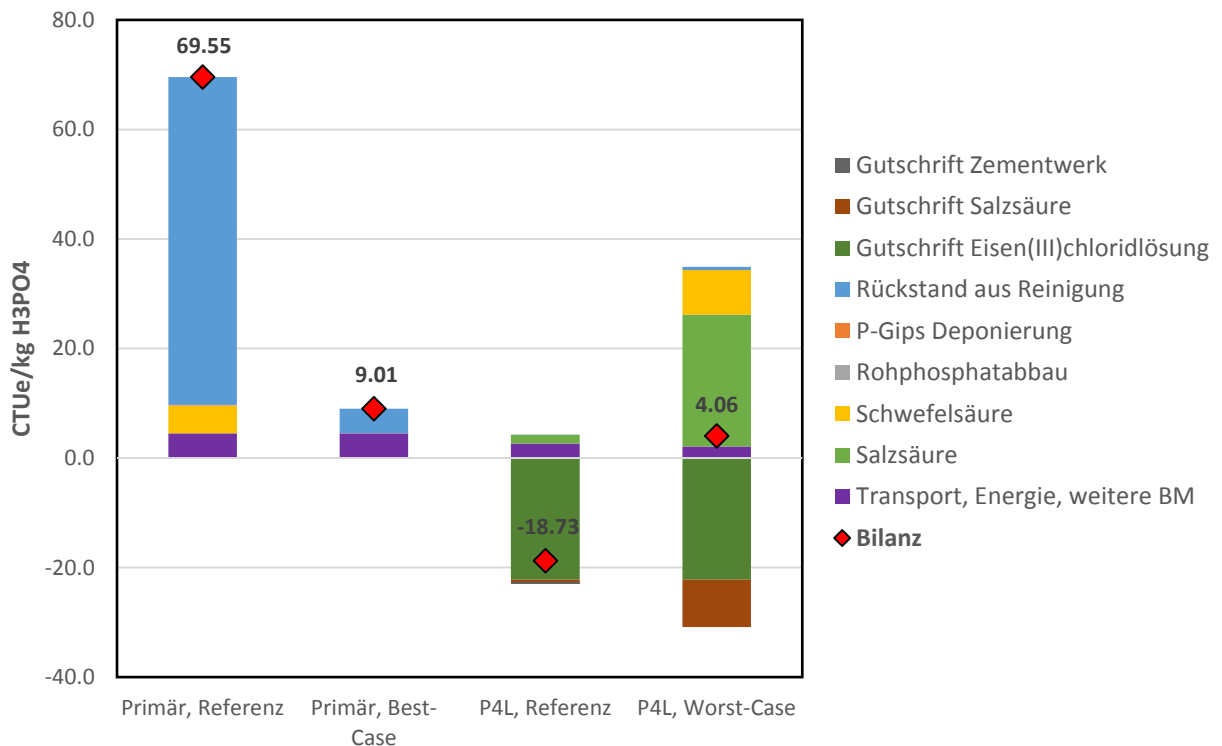


**Abbildung 14:** Worst-Case-Szenario P4L-Verfahren: Wirkungsabschätzung aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln. Die Gutschriften betreffen Nebenprodukte, welche wiederum Primärprodukte ersetzen können.

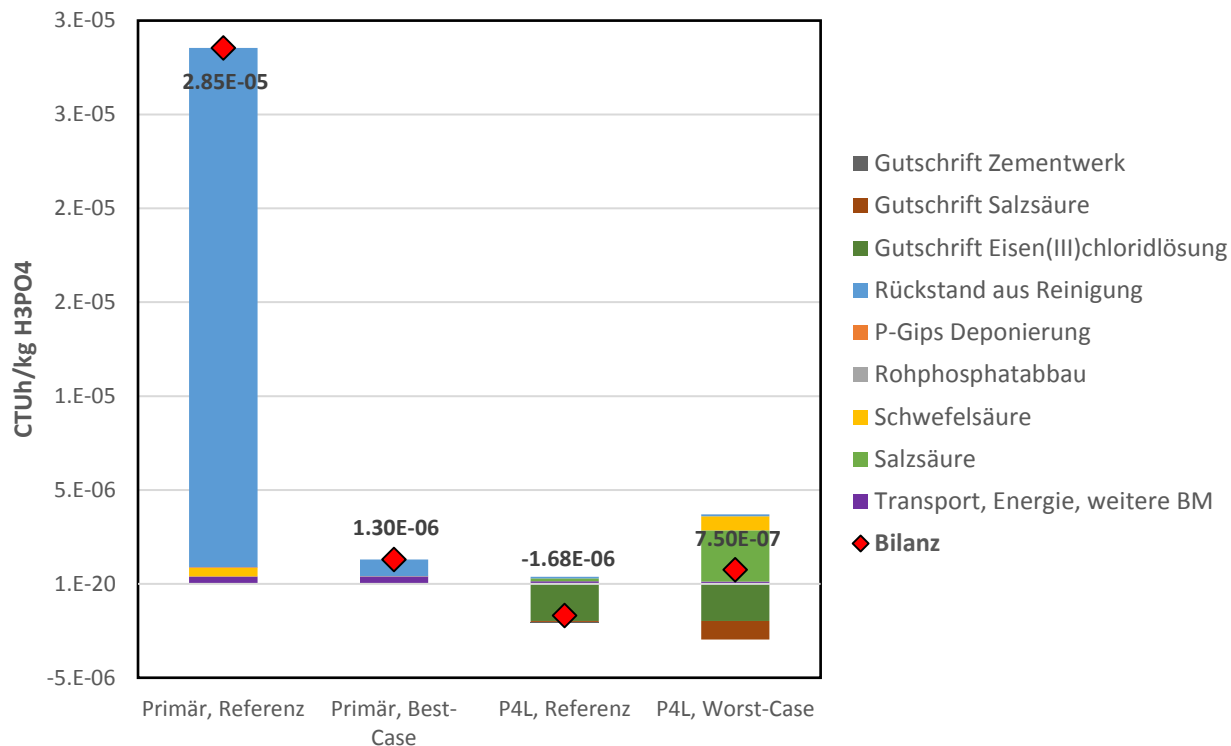




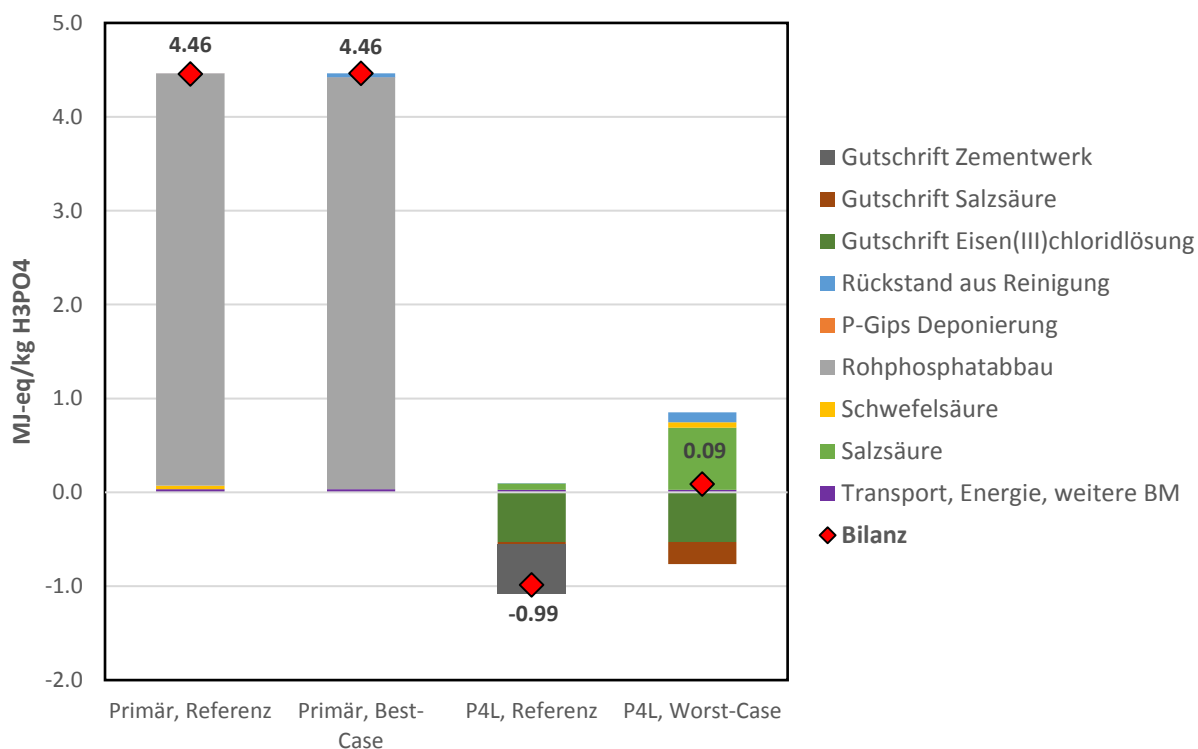
**Abbildung 15:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: IPCC GWP 2013 100a. Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).



**Abbildung 16:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: USEtox-Methode, Ökotoxizität. Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).



**Abbildung 17:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: USEtox-Methode, Humantoxizität. Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).

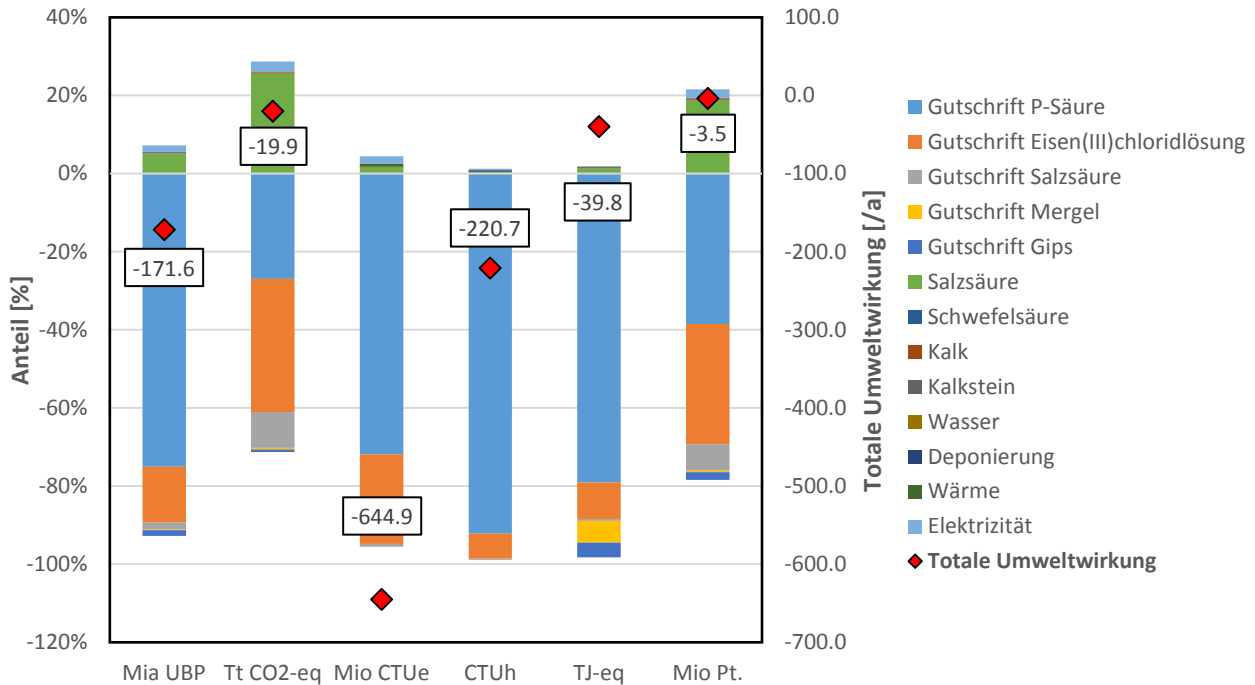


**Abbildung 18:** Resultate der Sensitivitätsanalyse: Cumulative exergy demand (CE<sub>x</sub>D), minerals. Referenzszenarien, Best-Case- (Primärproduktion) und Worst-Case-Szenario (P4L-Verfahren).

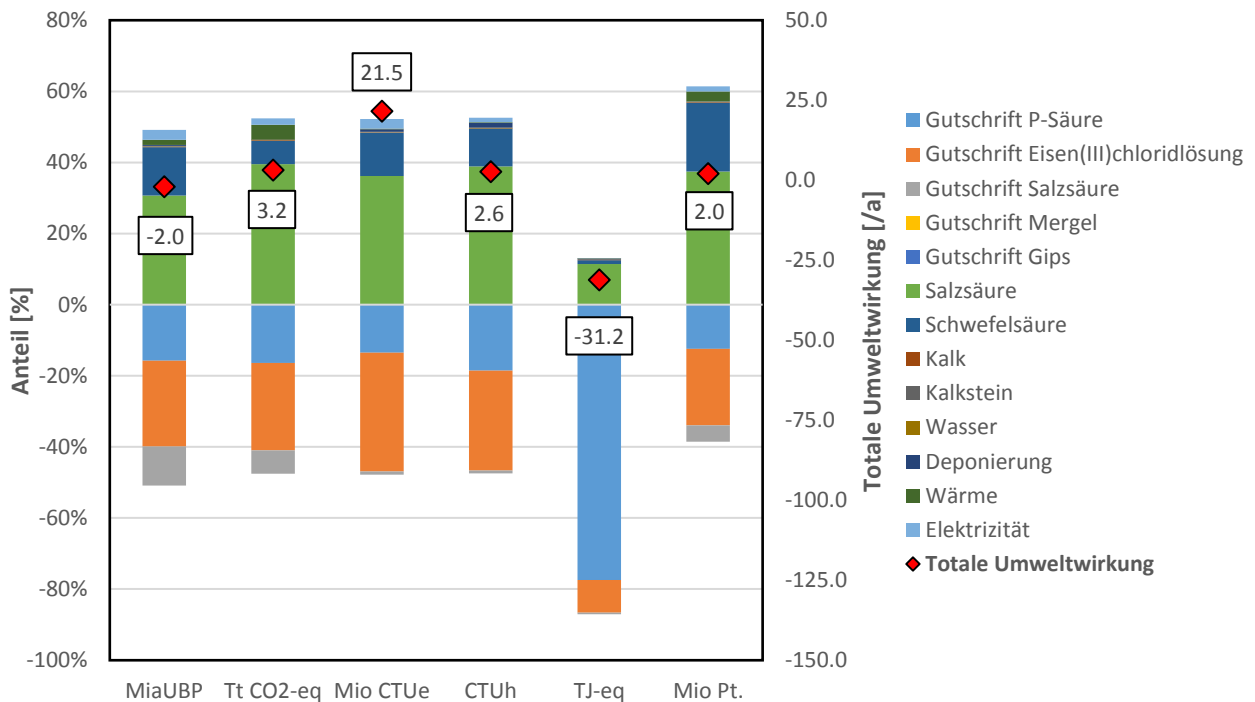
**Tabelle 28:** Resultate der Wirkungsabschätzung für die beiden Allokationsverfahren ökonomische Allokation und *cut-off*, sowohl für die Primärproduktion als auch für das P4L-Verfahren.

pro kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	UBP [UBP]	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq]	ETP [CTU <sub>e</sub> ]	HTP [CTU <sub>h</sub> ]	CE <sub>x</sub> D [MJ-eq]	ReCiPe, total [Pt.]
<b>Primärproduktion</b>						
ökonomische Allokation	19'881.40	1.56	246.47	4.28E-05	4.45	0.51
<i>cut-off</i>	19'200.84	1.32	64.52	2.81E-06	4.42	0.18
<b>P4L-Verfahren</b>						
ökonomische Allokation	2'326.52	1.48	269.11	2.18E-05	0.10	0.60
<i>cut-off</i>	568.48	0.20	2.71	2.25E-07	0.03	0.02

## Anhang 5 – Resultate P4L-Verfahren pro Jahr



**Abbildung 19:** Totale Umweltwirkung des P4L-Verfahrens (Referenzszenario) pro Jahr, aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln. Dabei mitberücksichtigt ist die Gutschrift für den Ersatz der primären P-Säure (hier: „Referenz“-Säure). Die Anteile sind so dargestellt, dass der Betrag aller Beiträge 100% ergibt.



**Abbildung 20:** Totale Umweltwirkung des P4L-Verfahrens (Worst-Case-Szenario) pro Jahr, aufgeschlüsselt nach Betriebsmitteln. Dabei mitberücksichtigt ist die Gutschrift für den Ersatz der primären P-Säure (hier: „Best-Case“-Säure). Die Anteile sind so dargestellt, dass der Betrag aller Beiträge 100% ergibt.