



**Universität für Bodenkultur Wien**

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

**AUFBEREITUNG/VERWERTUNG VON PFERDEURIN  
IM RAHMEN EINES NEU ENTWICKELTEN  
STALLBODENSYSTEMS**

**MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Diplom-Ingenieur**

im Rahmen des Studiums

**Nachhaltiges Energiemanagement**

eingereicht von

**Sandra Storm, BSc**

Matr. Nr.: 1108379

Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Institut für Verfahrens- und Energietechnik

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Christoph Pfeifer

Dipl.-Ing. Dr. Gregor Tondl

Wien, Mai 2018

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinen Betreuern Univ. Prof. Dr. Pfeifer und Dipl.Ing. Dr. Tondl die mich immer unterstützt haben und mir zur Seite gestanden sind.

Weiters möchte ich mich bei Gerhard Grabner und Ashraf Yanni für die tolle Zusammenarbeit bedanken.

Ebenfalls danken möchte ich Daniel Cenk, der mir zu Beginn bei der Destillation geholfen hat.

Ein großer Dank auch an meine Familie und meinen Freund, die immer hinter mir gestanden sind und mich auch in stressigen Zeiten unterstützt haben.

Herzlichen Dank!

## Kurzfassung

Ziel dieser Arbeit ist die wirtschaftliche Bewertung von Aufbereitungs- bzw. Verwertungsmethoden von Pferdeurin. Dieser wird mithilfe eines neuentwickelten Stallbodensystems gesammelt. Hiermit ist es möglich den Pferdeurin getrennt von der Einstreu zu sammeln und anschließend aufzubereiten, bzw. zu verwerten.

Da die Pferdehaltung in Europa in den letzten Jahrzehnten wieder zugenommen hat, kann die Verwertung von Pferdeurin landwirtschaftlich und energiepolitisch relevant sein.

In dieser Arbeit wird speziell die Herstellung eines Flüssigdüngers aus Pferdeurin näher untersucht. Dazu wurden praktische Versuche mithilfe einer Destillationsanlage durchgeführt.

Der Pferdeurin wurde vom Wasserforschungsinstitut Eawag auf seine Zusammensetzung untersucht, anschließend wurden Proben des destillierten Urins zur Analyse ins Labor des Institutes für Bodenforschung (IBF) gebracht. Dabei wurde festgestellt, dass sich nach der Destillation ein großer Teil der Nährstoffe weiterhin im Primärdünger (einer braunen Flüssigkeit) befindet.

Obwohl die Destillation ein sehr energieintensiver Prozess ist, kann der Energiebedarf auf bis zu 80 Wh/L gesenkt werden. In den industriellen Destillationsanlagen des Wasserforschungsinstitutes Eawag in Dübendorf in der Schweiz wurde ein Energiebedarf von 107 Wh/L erreicht. Dies hängt von der Größe der Apparatur ab.

Mithilfe der Literaturrecherche und eigener Versuche konnte festgestellt werden, dass sich Pferdeurin nach der Aufbereitung als Dünger eignet. Auch der Energiebedarf kann durch die Verwendung industrieller Destillationsanlagen niedrig gehalten werden.

**Schlüsselwörter:** Pferdeurin, Destillation, Energieeffizienz, Nährstoffrückgewinnung, Dünger

## **Abstract**

The aim of this thesis is the economic evaluation of treatment- and recovery methods of horse urine. This is collected using a newly developed stable floor construction. With this it is possible to collect the horse urine separately from the bedding and then prepare, or use.

As the equestrian management in Europe has increased again in recent decades, the exploitation of horse urine can be relevant to agriculture and energy policy.

In this master thesis, the preparation of a liquid fertilizer from horse urine is investigated in detail. Practical experiments were carried out using a distillation plant.

The horse urine was examined by the water research institute Eawag for its composition, and then samples of the distilled urine were sent to the laboratory of the institute of soil research (IBF) for analysis. It was determined that, after the distillation, a large portion of the nutrients are still present in the primary fertilizer (a brown liquid).

Although distillation is a very energy-intensive process, the energy requirement can be reduced to as little as 80 Wh/L. An energy requirement of 107 Wh/L could be achieved in the industrial distillation plants of the aquatic research institute Eawag in Dübendorf, Switzerland. This depends on the size of the distillation plant.

By means of literature research and own experiments, it was possible to establish that the horse urine is suitable for use as a fertilizer. The energy consumption can also be kept low by using industrial distillation equipment.

**Keywords:** horse urine, distillation, primary energy requirement, nutrient recovery, fertilizer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung der Fragestellung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
3.1	Trink- und Fressverhalten der Pferde	4
3.2	Zusammensetzung des Pferdeurins	6
3.3	Stallbodenkonstruktion	8
3.3.1	Lagerung von Urin	10
3.3.2	Transport	10
3.4	Mögliche Produkte aus Pferdeurin	11
3.5	Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren	23
3.5.1	Nitrifikation	24
3.5.2	Destillation	26
3.5.3	Phosphorelimination	28
3.5.4	Elektrolyse	30
3.5.5	Membranverfahren	32
3.5.5.1	Nanofiltration	32
3.5.5.2	Umkehrosmose	33
3.5.6	Elektrodialyse	34
3.5.7	Ozonierung	35
3.6	Düngerherstellung	36
<b>4</b>	<b>Methode</b>	<b>38</b>
4.1	Praktische Umsetzung	38
4.1.1	Der Destillationsvorgang	38
4.1.2	Praktische Versuche	42
4.1.3	Energieverbrauch	53
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>62</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>72</b>
<b>9</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>73</b>

# 1 Einleitung

Die Herstellung von Dünger für die Landwirtschaft benötigt nach Etter und Udert (2015, 2) viel Energie und Ressourcen. Das Haber-Bosch-Verfahren verbraucht zur Gewinnung von Stickstoff aus der Luft alleine mehr als ein Prozent des gesamten weltweiten Energiebedarfs. Die bekannten Vorräte für Phosphatgestein, um Phosphor für den Dünger herzustellen, sind in wenigen Ländern konzentriert. In Zukunft kann dies zu hohen Preisschwankungen führen. Somit ist es wichtig, Alternativen zur konventionellen Düngerherstellung zu finden. Pferdeurin kann hierbei eine solche Alternative darstellen.

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene mögliche Produkte aus Pferdeurin wirtschaftlich zu bewerten. Spezielles Augenmerk wird hier auf die Flüssigdüngerherstellung aus Pferdeurin gelegt.

Hierfür werden unterschiedliche Mengen des Urins destilliert und im Labor des Institutes für Bodenforschung (IBF), an der Universität für Bodenkultur in Wien analysiert. Unter anderem werden der Nährstoffgehalt sowie der Verlust einiger Stoffe durch die Destillation betrachtet. Außerdem wird ein Säureaufschluss gemacht, um Phosphor und Mikronährstoffe zu messen (annähernder Totalgehalt). Weiterhin werden Calcium- und Stickstoffgehalt im Totalanalysator ermittelt.

Zuallererst wird der/die Leser/in über das Fress- und Trinkverhalten des Pferdes aufgeklärt. Hier stellte sich heraus, dass Pferde nach Bender (2011, 3) im Durchschnitt zwischen 30 und 55 Liter Wasser pro Tag trinken und 5 bis 10 Liter Urin pro Tag abgeben. Die Zusammensetzung des Pferdeurins variiert je nach Fütterung und Haltungsform.

Bei den Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren werden Nitrifikation, Destillation, Elektrolyse, Phosphorelimination, Membranverfahren (Nanofiltration, Umkehrosiose), Elektrodialyse und Ozonierung näher beschrieben.

Im Anschluss an die Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren wird speziell auf die Düngerherstellung eingegangen.

Danach wird die neuentwickelte Stallbodenkonstruktion, mit deren Hilfe der Urin getrennt von der Einstreu und dem Pferdemist gesammelt werden kann, erklärt und Überlegungen zur Lagerung und dem Transport des Pferdeurins angestellt.

Außerdem werden mögliche Produkte aus Pferdeurin bewertet. Hierbei haben sich besonders die Düngerherstellung, das Östrogenpräparat Presomen® und die Wasserstoffherstellung aus Urin als wirtschaftlich erwiesen.

Zum Schluss werden die praktische Umsetzung und der Destillationsvorgang beschrieben. An dieser Stelle wird auch auf die einzelnen Versuche der Flüssigdüngerherstellung eingegangen. Zudem spielt der Energieverbrauch der Destillation eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit.

Hinterher werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und ein Ausblick auf mögliche weitere Forschungen in Hinblick auf Pferdeurin gegeben.

## 2 Zielsetzung der Fragestellung

Ziel dieser Arbeit ist die Bewertung der Wirtschaftlichkeit und Energieeffizienz möglicher Verwertungs- und Aufbereitungsmethoden von Pferdeurin, der mithilfe einer neuentwickelten Stallbodenkonstruktion gesammelt wird.

Aus diesem Grund wurde folgende Fragestellung gewählt:

- **Welche Aufbereitungs- und Verwertungsmethoden eignen sich wirtschaftlich am besten für den Pferdeurin aus der neuentwickelte Stallbodenkonstruktion?**

Jedes mögliche Produkt soll mittels einer SWOT-Analyse (Stärken-, Schwächen-, Chancen- und Risiko-Analyse) bewertet und anschließend nach Wirtschaftlichkeit gereiht werden.

### 3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen wurden aufgrund einer Literaturrecherche erstellt. In den folgenden Kapiteln werden das Trink- und Fressverhalten, die Zusammensetzung von Pferdeurin und die Aufbereitungsmöglichkeiten näher beschrieben.

#### 3.1 Trink- und Fressverhalten der Pferde

Der Magen-Darm-Trakt eines mittelgroßen Pferdes kann laut Bender (2009, 138) zeitweise Flüssigkeitsmengen von über 50 Litern enthalten.

Nach Bender (2011) hängt der Wasserbedarf vom Körpergewicht des Pferdes, von der Zusammensetzung des Futters, vom Klima und der Bewegung und von der psychischen Disposition ab. Der Bedarf schwankt stark und steigt durch hohe Umgebungstemperaturen, vermehrte Schweißbildung, durch Bewegung oder Stress sowie rohfaserreiches Trockenfutter wie Heu (Bender, 2011, 3).

**Tabelle 1: Trinkwassermenge in Abhängigkeit von Witterung und Gewicht pro Pferd**

<b>Witterung</b>	<b>Gewicht (in kg) pro Pferd</b>	<b>Durchschnittliche Trinkwassermenge (in Liter)</b>
<i>im Durchschnitt übers Jahr</i>	380	30-35
<i>bei 25 °C</i>	380	20-25
<i>im Durchschnitt übers Jahr</i>	600	45-55
<i>bei 25 °C</i>	600	35
<i>im Winter</i>	600	25-40

Im Durchschnitt trinkt ein großes Warmblutpferd um die 600 kg, das täglich eine Stunde durchschnittlich in Tempo 5 (= Arbeitstrab-Geschwindigkeit) geritten wird und Heu wie auch Krafffutter erhält laut Bender (2011, 3) etwa 45 bis 55 Liter am Tag. Bei Isländern um die 380 kg, die eine Stunde bewegt werden, sind rund 30 bis 35 Liter erforderlich. Bei Außentemperaturen um die 25 °C und Weidegang ohne Arbeitsleistung kann der Bedarf für ein Warmblutpferd bei nur 35 Litern am Tag liegen und bei einem Isländer zwischen 20 und 25 Litern (Bender, 2011, 3). Im Winter konnten nach Bender (2011, 3) minimale Tränkwassermengen von 25 Litern und maximale Mengen von fast 40 Litern bei nicht arbeitenden Warmblutpferden mit Heufütterung registriert werden.

Hochblütige Pferde nehmen laut Bender (2011, 3) trotz gleicher Voraussetzungen etwa 15 % mehr Wasser auf als Pferde einer nordischen Rasse wie Isländer und Fjordpferde.

Bei hohem Energieumsatz (körperliche Anstrengungen können den Wasserbedarf auf das Vierfache des Ruhebedarfs steigern), großer Hitze, trockener Luft, übermäßigem Kochsalzverzehr, starker Eiweißfütterung sowie bei Fieber kann der Wasserbedarf stark steigen.

Nach Meyer und Coenen (2002) kann bei leichter Arbeit von einem Mindest-Wasserbedarf in der Höhe von 5 bis 7 Litern je 100 kg Pferdegewicht ausgegangen werden.

Als Mindest-Rauhfuttermenge werden nach Autenrieth (2013, 7) 1 bis 1,5 kg Heu je 100 kg Pferdegewicht, verteilt auf drei bis fünf Mahlzeiten, angesehen. Bei dieser Menge ist ein Pferd ausreichend versorgt.

Laut Nebe und Francken-Welz (s.a.,1) fallen pro Pferd und Tag 10 bis 20 kg Kot und 5 bis 10 Liter Harn an, das ergibt eine Strohmistmenge von 20 bis 35 kg. In der Vegetationszeit mit Grünfuttermitteln steigt die Wasserabgabe über den Kot. Die Urinmengen verringern sich dadurch um 30 bis 50 % (Bender, 2009, 138). Die Menge an aufgenommenem Wasser ist deutlich höher als die über den Urin ausgeschiedene Menge. Ein Großteil des Wassers wird nach Bender (2011, 1) für den Stoffwechsel, zur Produktion von Drüsensekreten (Speichel und Magensäure), zur Flüssigerhaltung des Blutes und zur Thermoregulation verwendet. Das Restwasser wird über die Nieren in Form von Urin, den Darm durch Kot, über die Haut durch Schweiß, die Lunge über Ausatemungs- und Hustentröpfchen und über das Euter durch Milch ausgeschieden.

**Tabelle 2: Referenzbereiche – Pferd**

Harn	Adultes Pferd
Urinmenge (ml/kgKM <sup>1</sup> /d)	15 – 50

Im Vergleich belaufen sich die durchschnittlichen Urinmengen beim Menschen laut Schaal et al. (2016, 157) auf 1,5 bis 2 Liter pro Tag. Dies ist nur ungefähr ein Fünftel der täglich abgesetzten Menge Urin, im Vergleich zum Pferd.

Nach Keller (1999, 244) ist der Pferdeurin physiologischerweise alkalisch (pH 6,8 – 8,5), dünn- oder dickflüssig und beim Absetzen trüb, mit einer gelblichen Färbung. Er ist reich an Kalkkarbonaten und arm an Phosphaten (Baumgartner (2005, 198).

---

<sup>1</sup> KM...Körpermasse

Zu beachten ist, dass Pferde eine physiologische Kristallurie zeigen. In dem sehr hohen Harn-pH-Wert von Pflanzenfressern fallen vor allem Calciumcarbonat- und gelegentlich auch Calciumphosphatkristalle aus (Synlab, s.a.).

Nach Meyer und Coenen (2002, 10) weist der Harnstoffgehalt im Blut des Pferdes eine Konzentration von ungefähr 6 bis 12 mg/L auf. Ein erhöhter Harnstoffgehalt im Blut kann aufgrund eines Wassermangels, einer Eiweißübersorgung oder einer Nierenerkrankung auftreten. Ein Mensch dagegen scheidet täglich nur 2 bis 4,5 mg/L Harnstoff pro Tag über den Harn aus, und der Harnstoffgehalt im Blut beträgt auch nur 1,2 bis 4,8 mg/L.

### 3.2 Zusammensetzung des Pferdeurins

Nach Schwendenwein (2017) variiert die Zusammensetzung des Pferdeharns je nach Fütterung und Haltungsform recht stark, sodass es hier keine Referenzwerte gibt. Dieser Umstand liegt zum Teil auch daran, dass gesunder Pferdeharn zähflüssig ist. Dies erschwert Untersuchungen, da es aufwendig ist, den Nativharn in Analysesysteme einzubringen. Auch die Östrogenwerte bei Stuten schwanken saisonal und zyklusabhängig sehr stark.

Der Stickstoffgehalt liegt nach Meyer und Coenen (2002, 13) im Mittel mit 0,57 % der Frischsubstanz in der Größenordnung von Rindermist. Die Phosphor-, Calcium- und Magnesiumgehalte sind etwas niedriger als in Rindermist. Der Kaliumgehalt ist umso höher, je mehr Stroh im Mist vorhanden ist.

**Tabelle 3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Pferdeurin (Zeyner, 2017, 7)**

Parameter	Einheit	Analyse Pferdeurin
<b>Phosphor (P)</b>	mmol/L	0,14 – 1,75
<b>Stickstoff (N)</b>	mmol/L	2 – 9
<b>Calcium (Ca)</b>	mmol/L	2,64 – 11,6
<b>Kalium (K)</b>	mmol/L	7 – 19,43
<b>Magnesium (Mg)</b>	mmol/L	1,48 – 14,45
<b>Natrium (Na)</b>	mmol/L	13,54 – 75
<b>Zink (Zn)</b>	mg/100 kg KM	0,7 – 1
<b>Kupfer (Cu)</b>	mg/100 kg KM	0,12

*Tabelle 4* zeigt den Vergleich zwischen Pferdeurin und menschlichem Urin. Die Werte wurden von der Eawag, dem Wasserforschungsinstitut der ETH Zürich, ausgewertet (Udert, 2016).

Der pH-Wert in der Probe des Pferdeurins war relativ hoch (9,3). Dies ist auf die Harnstoffhydrolyse zurückzuführen. In gelagertem menschlichem Urin ist das ebenso der Fall. Im Vergleich zu menschlichem Urin sind aber einige Unterschiede zu vermerken:

Während der Lagerung ist das gesamte Phosphat ausgefallen. Dadurch ist die Phosphatkonzentration sehr niedrig. Dies ist wiederum durch die hohe Magnesiumkonzentration bedingt. Der Magnesiumwert im Pferdeurin ist unerwartet hoch, da einigen Pferden Magnesium zugefüttert wurden. Hier erkennt man, wie stark die Werte von der Fütterung abhängen.

Neben Magnesium ist auch die Kaliumkonzentration sehr hoch, dafür fehlt Natrium fast vollständig. Die Konzentration an gelösten organischen Stoffen (CSBgel) ist ebenfalls sehr hoch.

Aufgrund der Messwerte kann davon ausgegangen werden, dass Pferdeurin gut mit dem Nitrifikationsverfahren behandelt werden kann. Allerdings müsste das Verfahren an den hohen CSBgel-Gehalt angepasst werden.

**Tabelle 4: Vergleich Pferdeurin (Udert, 2016) und menschlicher Urin (Udert et al., 2006)**

Parameter	Einheit	Analyse Pferdeurin	Referenz menschlicher Urin
<b>Ammoniumstickstoff</b> (NH <sub>4</sub> -N)	mg/L	4490	8100
<b>Nitritstickstoff</b> (NO <sub>2</sub> -N)	mg/L	<10	-
<b>Nitratstickstoff</b> (NO <sub>3</sub> -N)	mg/L	<10	-
<b>Phosphat-Phosphor</b> (PO <sub>4</sub> -P)	mg/L	<10	540
<b>Sulfat</b> (SO <sub>4</sub> )	mg/L	1500	1500
<b>Chlor</b> (Cl)	mg/L	4845	3800
<b>Natrium</b> (Na)	mg/L	<5	2600
<b>Kalium</b> (K)	mg/L	13108	2200
<b>Calcium</b> (Ca)	mg/L	<10	0
<b>Magnesium</b> (Mg)	mg/L	433	0
<b>pH-Wert</b>	bei 20 °C	9,3	9,1
<b>Leitfähigkeit</b>	mS/cm (nicht temperaturkompensiert)	46,5	-
<b>CSBgel.</b> (Chemischer Sauerstoffbedarf)	mg/L	37200	10000
<b>Azetat</b>	mg/L	4250	4600

### 3.3 Stallbodenkonstruktion

Die Stallbodenkonstruktion (siehe *Abb. 1, 2 und 3*) besteht nach Terram (2016) aus mehreren Schichten, hat eine Größe von 12 m<sup>2</sup> und ist 8 cm dick. Diese Konstruktion wird direkt auf dem Stallboden in den Boxen angebracht. Hiermit ist es möglich, den Pferdeurin von der Boxeneinstreu zu trennen und somit die Ursache von gesundheitsgefährdenden Zuständen weitgehend zu vermeiden. Zudem bleiben die Boxen durch das Abfließen des Urins überwiegend trocken und die Ammoniakbildung wird stark reduziert. Dies führt zu einer Erleichterung des Arbeitsaufwandes beim Ausmisten, senkt Gesundheitsrisiken wie Atemwegserkrankungen und bakterielle Infektionen für Tier und Mensch und spart außerdem eine Menge Einstreu (Terram, 2016).



**Abbildung 1: Stallbodenkonstruktion**

Nachfolgend werden die verschiedenen Ebenen der Stallbodenkonstruktion aufgezeigt und näher erklärt (Terram, 2016):

**Ebene 1** hat eine Schrägebene zur Sicherstellung eines Gefälles von mindestens 1,5 %.

Vorne ist der Bodenablauf 0,5 cm dick und wird nach hinten zu dicker, bis zu 2 cm.

In Ebene 1 befindet sich auch der Bodenablauf.

**Ebene 2** ist die Dichtebene und dient als (temporäres) Sammelbecken für den Urin. Dieses ist mit einer Spülleitung und Abflussöffnung versehen.

Bei **Ebene 3** handelt es sich um die Trageebene, die für Pferde mit über 1000 kg ausgelegt ist.

**Ebene 4** ist die Dämpfungsebene mit integrierten Siebelementen, einer (Gummi)matte mit runden Öffnungen für Urin (Substrat)-Durchlass. Hierbei sollen ein guter Stand sowie die Schonung von Sehnen und Gelenken gewährleistet werden.

Die letzte Ebene bildet **Ebene 5**, die als Einstreu-Ebene dient. Hier sollte möglichst saugarmes Material verwendet werden. Dies trägt zum Wohlbefinden des Pferdes bei und

erleichtert das Ausmisten der Pferdeäpfel.

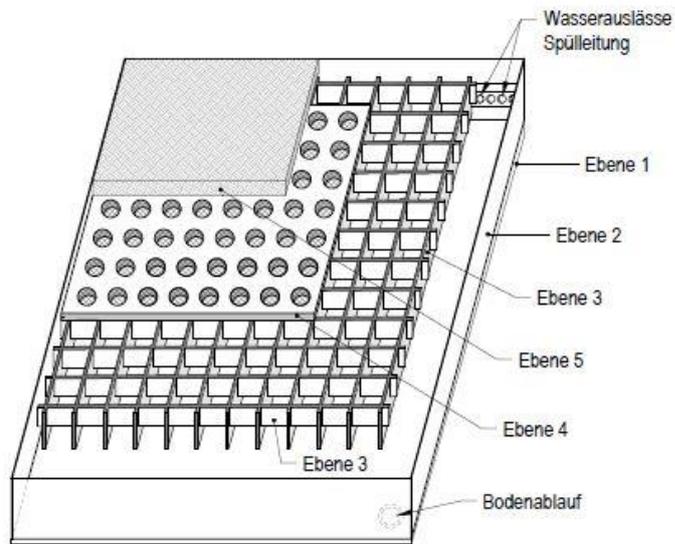


Abbildung 2: Stallbodenkonstruktion (Aufsicht) (Terram, 2016)

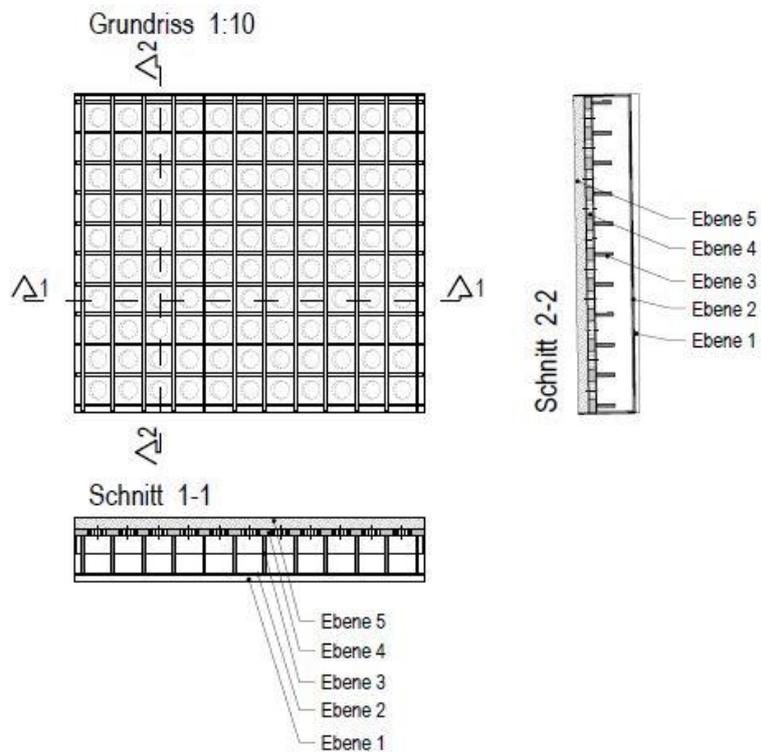


Abbildung 3: Stallbodenkonstruktion (Schnitte) (Terram, 2016)

Nach Terram (2016) sinkt die Ammoniakbelastung durch diese Stallbodenkonstruktion auf unter 10 ppm, im Gegensatz zur herkömmlichen Boxenwirtschaft bei der die Ammoniakbelastung zwischen 17 und 35 ppm liegt.

### **3.3.1 Lagerung von Urin**

Nach Larsen et al. (2007, 5) können sich die Lagerung und der Transport des Pferdeurins als schwierig erweisen.

Bei der Stallbodenkonstruktion wird der Urin unmittelbar aus der Box in eine Güllegrube abgeleitet. Der Urin fließt mit Hilfe der Schrägstellung der Konstruktion ab und fließt anschließend in eine Güllegrube wo er gesammelt wird. Somit kommt es nicht zur Bildung des für Mensch und Tier schädlichen Ammoniaks (Terram, 2016).

Der gesammelte Urin kann nach Maurer (2007, 14) Krankheitskeime enthalten, diese können von kranken Pferden stammen oder durch die Kontaminierung mit Fäkalien entstehen. Der Urin kann durch Lagerung hygienisiert werden. Hierbei lagert man den Urin über mehrere Monate bei einer entsprechenden Lagertemperatur. Durch Tests konnte festgestellt werden, dass sechs Monate Lagerdauer bei 20 °C ausreichend sind, um einen hygienisch einwandfreien Urin zu erhalten. Weitere Optionen wären die Bestrahlung mit UV-Licht oder eine Hochdruckbehandlung. Diese wurden aber noch nicht im Zusammenhang mit Urin getestet (Maurer, 2007, 14).

### **3.3.2 Transport**

Der Urin könnte laut Larsen et al. (2007, 5) mithilfe von Tankwagen oder separaten Leitungen vom Speicher zu einer zentralen Aufbereitungsanlage geführt werden.

Eine Alternative zum schwierigen und/oder teuren Transport stellt der dezentrale Prozess dar. Dazu müssten die Möglichkeiten und die Wirtschaftlichkeit dezentraler Prozesse durchgegangen werden. Die Kombination von Phosphorfällung und biologischer Stickstoffelimination wäre in diesem Fall aussichtsreich. Allerdings wären hierfür neue Leitungen notwendig.

Problematischer werden nach Larsen et al. (2007, 5) die Stabilität und die Wartungsintensität dezentraler Verfahren eingestuft, besonders bei den biologischen Prozessen.

### **3.4 Mögliche Produkte aus Pferdeurin**

#### **Dünger**

Durch die Ausfällung von Phosphor Struvit aus Pferdurin hergestellt werden. Außerdem kann durch eine Kombination aus Nitrifikation und anschließender Destillation ein Flüssigdünger hergestellt werden.

Im Jahre 1913 wurde das Haber-Bosch Verfahren von dem deutschen Chemiker Fritz Haber und dem Ingenieur Carl Bosch entwickelt. Dabei werden Wasserstoff und Stickstoff aus Erdgas nach der Synthesegas-Erzeugung gewonnen. Aus dem gewonnenen Wasserstoff und Sauerstoff wird dann Ammoniak hergestellt. Heutzutage werden ca. 90 % aller Düngemittel aus Ammoniak gewonnen. Dieser Prozess benötigt nach Brudenell (2003) allerdings sehr viel Energie. Im Jahr 2000 wurde vom europäischen Düngerhersteller-Verband ein Energieverbrauch von 37,4 GJ pro Tonne produziertem Ammoniak verzeichnet.

Die weltweite Jahresproduktion von Ammoniak liegt zwischen 130 und 140 Millionen Tonnen und der weltweite Energieverbrauch bei ungefähr 5,4 Exajoule bzw. 1,5 Billionen kWh.

Die Düngerherstellung stellt vermutlich das größte Potential für die Verwertung des Pferdeurins dar, denn momentan werden weltweit etwa 70 % des potenziell verfügbaren Trinkwassers für die Landwirtschaft verbraucht. Außerdem werden die Kosten für N- (energieintensiv) und P-Dünger (nicht erneuerbare Steinphosphatvorkommen) in naher Zukunft stark steigen (Schüßler, 2011, 20).

Tabelle 5: SWOT-Analyse: Dünger

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	Nachhaltig, innovatives Produkt, Weiternutzung von Abfallprodukten, Kreislaufwirtschaft, keine Verschwendung von Ressourcen, ökonomische und ökologische Verträglichkeit	Qualitätsschwankungen, hohe Kosten für Lagerung, Transport und Aufbereitung, Energieverbrauch (107 Wh/L) der Destillation (Udert, 2017)
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Unternehmen könnte Pionier auf diesem Gebiet werden, vorhandenes notwendiges Knowhow, Nutzen des Produktes wird erkannt, Produkt entspricht dem Nachhaltigkeits-Trend	Zu wenige Abnehmer, andere Anbieter bringen ähnliches Produkt günstiger auf den Markt, Unsicherheit bei Kunden, ob Produkt hält, was es verspricht

## Östrogenpräparat

Aus dem östrogenreichen Urin trächtiger Stuten (PMU = Pregnant Mare Urine) wird laut PeTA (2007) das Östrogenpräparat Presomen® hergestellt. Weltweit wird Frauen mit Wechselbeschwerden zu 80 % das Medikament Presomen® gegen Beschwerden während der Wechseljahre verschrieben. Andere Hormonpräparate mit Stutenurin: Premarin®, Premarin® plus, Cyclo-Premella®, Duavive®, Presomen® 28 compositum, Presomen® conti Climopax® cyclo, Climopax® mono.

Laut Adamus (2017) wird für das Präparat heutzutage ein Teil der Östrogene synthetisch hergestellt und die konjugierten Östrogene (ein Gemisch von Östrogenen) aus dem Urin trächtiger Stuten gewonnen. Die konjugierten Östrogene besitzen sehr ähnliche pharmakologische Wirkungen wie im menschlichen Körper gebildete Östrogene. Dieser Urin wird von PMU Farmen in Kanada bezogen. Zum Großteil werden Stuten der Rassen Percheron, Brabanter, American Quarter Horses und American Pain Horses eingesetzt.

Während sieben von elf Monaten Tragezeit (November bis Mai) werden die Stuten nach Brügger (1997) Tag und Nacht im Stall angebunden. Die Größe der Boxen beträgt hier meistens 1,5 x 2,4 m. Dabei sind die Stuten an eine Vorrichtung angeschlossen, die den östrogenreichen Urin sammelt. Diese Vorrichtung funktioniert laut PeTa (2007) wie eine Bettpfanne und wird dabei fest an das Hinterteil der Stute gepresst. Diese Vorrichtung erzeugt häufig Schorf und Läsionen. Nachdem die Stuten gefohlt haben, geht der Zyklus von vorne los. Dieser Zyklus dauert etwa 12 Jahre.

Die Fohlen werden 3 bis 4 Monate gesäugt und anschließend vom Muttertier getrennt. Die natürliche Laktation beträgt normalerweise mindestens 1 Jahr. Zwei Drittel der Fohlen, die von den PMU-Stuten geboren werden, kommen zum Schlachter (Brügge, 1997).



**Abbildung 4: Winnipeg "Pee Farm" (Allin, 2013)**

In Deutschland ist Presomen® das am häufigsten verschriebene Östrogenpräparat und wurde im Jahr 2007 von ungefähr einer Million Frauen eingenommen (PeTA, 2007). Presomen® wird von der Firma Abbott Arzneimittel GmbH in Neustadt am Rübenberge, Hannover hergestellt.

Eine Tablette Presomen® enthält:

**Tabelle 6: Bestandteile Presomen® / Tablette (Mylan Healthcare GmbH, 2016)**

<b>Aktiver Wirkstoff</b>	Östrogene, konjugiert (0.6 mg pro Stück)
<b>Sonstige Bestandteile</b>	Gummi arabicum Carmellose, Natriumsalz Carnaubawachs Cellulose, mikrokristallin Lactose-1-Wasser Macrogol 6000 Magnesiumoxid, leicht Magnesiumstearat (Ph. Eur.) [pflanzlich] Maisstärke Povidon K25 Saccharose Schellack Talkum Titandioxid Tricalciumphosphat gebleichtes Wachs

Die Farmer haben laut PeTA (2007) Verträge mit Wyeth Organics (früher Ayerst Organics) mit Sitz in Brandon, Manitoba, dem kanadischen Zweig der Wyeth-Ayerst.

Mit dem Handel des Urins kann ein Preis von 3,50 – 4,50 € pro Liter erreicht werden. Die Farmer in North Dakota, Manitoba, Alberta und Saskatchewan erzielen mit diesem Produkt umgerechnet ein Nettoeinkommen von 92 000,- – 184 000,- € pro Jahr (PeTA, 2007).

Pro Zuchtstute könnten hierbei von heimischen Produzenten (auf sieben Monate berechnet) 3 700,- – 9 400,- € erzielt werden (in Abhängigkeit von abgesetzter Urinmenge pro Tag und Preis pro Liter). Außerdem könnten die Transportkosten deutlich gesenkt und zusätzlich CO<sub>2</sub> eingespart werden, wenn Zuchtbetriebe aus Europa (speziell Deutschland, Österreich und der Schweiz) den Urin für das Medikament Presomen® liefern würden.

Hierbei wäre es möglich, die neuentwickelte Stallbodenkonstruktion einzusetzen, um das Leid dieser Stuten zu reduzieren. Die Stallbodenkonstruktion könnte an Zuchtbetriebe auf der ganzen Welt verkauft und so der Urin von Tausenden tragenden Stuten gesammelt werden. Dadurch könnte eine Nebeneinnahmequelle für Pferdezuchtbetriebe lukriert,

gleichzeitig zu einem Umdenken angeregt werden und nach Möglichkeit einige der „traditionellen PMU-Farmen“ unter Druck gesetzt und zur Umstellung bewegt werden.

**Tabelle 7: SWOT-Analyse: Östrogenpräparat**

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	Weiternutzung von Abfallprodukten, tierschutzgerecht	Herkömmliche Methode bevorzugt, weil kostengünstiger?
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Leid der Stuten könnte verringert werden, verkürzte Transportwege, weniger CO <sub>2</sub> -Ausstoß durch verkürzte Transportwege, lukrative Nebeneinnahmequelle für Zuchtbetriebe	mögliches Kommunikationsproblem → genügend Züchter müssen erreicht und das Interesse der Pharmazie geweckt werden

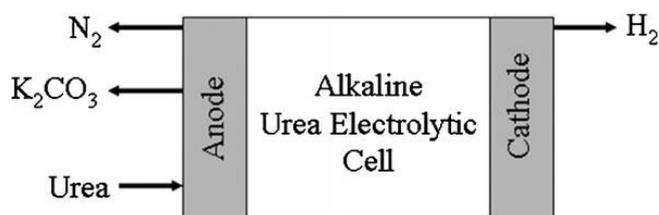
## Wasserstoff

Heutzutage wird Wasserstoff zumeist aus Erdöl gewonnen. Dies könnte sich bald ändern, denn schon im Jahre 2009 haben Boggs et al. (2009, 4859) eine neue Technologie entwickelt. Damit könnten Urin und Harnstoff in reinen Wasserstoff umgewandelt werden. Dies geschieht mithilfe elektrochemischer Oxidation mit einem relativ preisgünstigen Nickelkatalysator.

Die Elektrooxidation von Harnstoff ermöglicht laut Boggs et al. (2009, 4859) gleichzeitig Brennstoffproduktion und Sanierung von schädlichen Stickstoffverbindungen, die derzeit in die Atmosphäre und ins Grundwasser gelangen. Reiner Wasserstoff wurde im Kathodenraum mit 1,4 V Zellpotential gesammelt, einem Bereich wo die Wasserelektrolyse nicht merklich eintritt. Ein kostengünstiger Nickelkatalysator ist der stabilste und aktivste für diesen Prozess.

Der anteilmäßig größte Bestandteil des Urins ist Harnstoff, der eine signifikante organische Quelle von Wasserstoff (H), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) ist. Da noch keine Technologie existiert, mit der Harnstoff direkt in Wasserstoff umgewandelt werden kann, wurde nach Boggs et al. (2009, 4859) ein elektrochemischer Prozess entwickelt, der Wasserstoff (H<sub>2</sub>) aus Urin bzw. Harnstoff herstellt. Hierbei kann der Harnstoff mit einem Übergangsmetall (Nickel) elektrochemisch oxidiert werden.

Das Verfahren zur Gewinnung von Wasserstoff aus Harnstoff ist relativ einfach. An der einen Elektrode oxidiert der Harnstoff zu Stickstoff und Kohlendioxid, an der anderen Elektrode wird Sauerstoff produziert (Botte, 2014).



**Abbildung 5: Elektrochemischer Prozess (Boggs et al., 2009, 4859)**

Folgende Gleichungen konnten in Bezug auf menschlichen Urin aufgestellt werden:

- 1  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2(\text{aq}) + 6\text{OH}^- \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{CO}_2(\text{g}) + 6\text{e}^-$
- 2  $\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{OH}^- \rightarrow \text{NiOOH}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{e}^-$
- 3  $6\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2(\text{g}) + 6\text{OH}^-$
- 4  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{N}_2(\text{g}) + 3\text{H}_2(\text{g}) + \text{CO}_2(\text{g})$

Dafür wurden Energie- und Wasserstoffkosten von Harnstoff und Wasser auf Basis von € 0.065 kWh<sup>-1</sup> (umgerechnet von \$ 0.07 kWh<sup>-1</sup>) verglichen.

**Tabelle 8: Vergleich Energie- und Wasserstoffkosten von Harnstoff und Wasser (Boggs et al., 2009, 4861)**

Elektrolyse	Energie / Wh g <sup>-1</sup>	Wasserstoffkosten / € kg <sup>-1</sup>
Harnstoff	37,5	2,46
Wasser	53,6	3,87

Grundsätzlich wird Wasserstoff laut Feyrer et al. (2008, 5) als Energieträger oder -speicher eingesetzt. Die Umsetzung der Energie aus dem Wasserstoff kann durch die klassische

Verbrennung zur Bereitstellung von Wärme oder durch die Verwendung der Brennstoffzelle zur direkten Erzeugung von elektrischer Energie erfolgen. Hierbei können, je nach Brennstoffzellen-Typ, unterschiedlichste Leistungs- und Baugrößen bei unterschiedlichen Arbeitstemperaturen und Brennstoffqualitäten realisiert werden.

Nach Feyrer et al. (2008, 5) stellen Speicherung und Lagerung des Wasserstoffs oft ein Problem dar. Die Speicherung des Wasserstoffs könnte in gasförmigem oder flüssigem Zustand sowie als chemische Verbindung des Wasserstoffs in Hydridspeichern erfolgen (Ohl, 2009, 11). Meist wird Wasserstoff laut Feyrer et al. (2008, 5) gasförmig bei 200 – 700 bar in Druckbehältern oder in flüssiger Form bei -253 °C in Kryostaten gespeichert. Hierbei werden hohe Drücke und tiefe Temperaturen verwendet, um eine möglichst hohe Energiedichte zu erhalten. Noch nicht weit verbreitet ist die Möglichkeit der Speicherung in Feststoffen, wie zum Beispiel Metallhydriden. Diese befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase (Feyrer et al., 2008, 5).

Die massenbezogene Energiedichte von Wasserstoff liegt nach Ohl (2009, 11) mit 33,3 kWh/kg deutlich höher als bei Erdgas bzw. Benzin mit 13,9 bzw. 12,7 kWh/kg. Im Vergleich besitzen fossile Kraftstoffe aber deutlich höhere volumenbezogene Energiedichten.

Der Transport kann nach Feyrer et al. (2008, 5) mittels LKW, Bahn oder durch Pipelines erfolgen. Ebenso besteht die Möglichkeit einer dezentralen Erzeugung von Wasserstoff.

Der Harnstoff im gelagerten Pferdeurin könnte mithilfe der Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt werden. Für eine 20-Liter (200 bar)-Füllung Wasserstoff erhält man in Österreich zwischen 37 und 60 €. Der Wasserstoff könnte außerdem an Tankstellen verkauft werden. In Österreich vertreibt zum Beispiel das Unternehmen OMV AG Wasserstoff. Dies könnte eine lukrative Nebeneinnahmequelle für Pferdestallbetreiber darstellen.

**Tabelle 9: SWOT-Analyse: Wasserstoff**

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	nachhaltig, innovatives Produkt, Weiternutzung von Abfallprodukten, umweltschonende Materialien	Sehr hoher Energieverbrauch der Elektrolyse, Lagerung des Wasserstoffs ist aufwendig, teuer
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Unternehmen könnte Pionier auf diesem Gebiet werden, lukrative Einnahmequelle, Energie-Nachhaltigkeit durch Recycling von Abfallstoffen	Zu wenige Abnehmer, andere Anbieter bringen ähnliches Produkt günstiger auf den Markt, Wasserstoff-Qualität, Tankstellen zeigen kein Interesse an Abnahme des Wasserstoffs

### Strom

Britische Forscher haben es laut Schroeder (2015) geschafft, Strom aus Urin herzustellen. Dies erreichten sie im Bristol BioEnergy Centre durch eine mikrobielle Brennstoffzelle, die den Urin als Brennstoff nutzt. Mikrobielle Brennstoffzellen sind Energiewandler, in denen der Urin durch den Metabolismus von konstituierenden Mikroorganismen direkt in Strom umgewandelt wird. Im Inneren der Brennstoffzelle befinden sich lebende Organismen. Diese nehmen den Brennstoff auf und produzieren daraus Elektronen.

Die keramischen Brennstoffzellen werden nach Ieropoulos et al. (2013, 15312) aus poröser Keramik hergestellt. Ihre durchschnittliche Länge beträgt 10,2 cm, sie haben einen Außendurchmesser von 3,5 cm und einen Innendurchmesser von 2,5 cm. Das Volumen entspricht ungefähr 49 ml.

Zwölf zylindrische Brennstoffzellen wurden in Kaskaden von drei Einheiten angeordnet, wobei die vier Kaskaden den Stapel bilden (Ieropoulos et al., 2013, 15313).

Mithilfe dieser Technologie konnte genügend Strom erzeugt werden, um einen Handyakku aufzuladen.

Die Brennstoffzellen kann man laut Ieropoulos et al. (2013, 15315) schon für unter 1,50 € pro Stück herstellen lassen. Eine Brennstoffzelle kann aus 25 ml Harnstoff innerhalb von drei Tagen Strom von 0,25 Milliampere erzeugen.

Die Stallbodenkonstruktion könnte verwendet werden, um aus dem Urin Strom für den Stall herzustellen. Somit könnten Pferdestallbetriebe und Bauernhöfe ohne externe Stromzufuhr auskommen.

**Tabelle 10: SWOT-Analyse: Strom**

<b>SWOT-Analyse</b>	<i>Interne Analyse</i>	
	<b>Strengths (Stärken)</b>	<b>Weaknesses (Schwächen)</b>
<i>Externe Analyse</i>	nachhaltig, Weiternutzung von Abfallprodukten, umweltschonend	teurer als herkömmlicher Strom (Kosten für Stallboden, Lagerung, Aufbereitung), Urin müsste dezentral aufbereitet werden → Kosten steigen
	<b>Opportunities (Chancen)</b>	<b>Threats (Risiken)</b>
	Bauernhöfe / Pferdehaltungsbetriebe könnten ohne externe Stromzufuhr auskommen; auch in Dörfern möglich, die von Stromversorgung abgeschnitten sind	zu wenige Abnehmer, Unsicherheit bezüglich Stromversorgung

### **Globuli**

Die Urtinktur ist nach Dahler et al. (2008, 34) ein Verfahren, um bestimmte tierische oder pflanzliche Ausgangsstoffe in eine lösliche Form zu bringen. Dies können Auszüge aus Tieren, Teile von Tieren sowie deren Absonderungen in Verbindung mit einem Lösungsmittel sein. Nosoden werden ebenfalls in Urtinktur hergestellt.

Hierbei wird laut Dahler et al. (2008, 34) der Ausgangsstoff in einem Wasser-Ethanol-Gemisch angesetzt und filtriert. Ebenso findet Glycerin bei bestimmten Stoffen von Tieren und Nosoden Verwendung.

Durch Potenzieren (Verschütteln und/oder Verdünnen) werden aus Urtinkturen homöopathische Arzneimittel hergestellt. Manchmal finden Urtinkturen selbst auch Verwendung als homöopathische Arzneimittel (Schröter, 2013, 138).

Nach Lara (1997) können Globuli, die Urin enthalten, zum Beispiel Zahnschmerzen und Kopfschmerzen innerhalb weniger Minuten beseitigen.

Mithilfe der Stallbodenkonstruktion kann der Urin von Pferden gesammelt und anschließend zu Globuli weiterverarbeitet werden. Allerdings müsste hierfür die Akzeptanz der Bevölkerung gesteigert werden, da die meisten Menschen ein Ekelgefühl gegenüber Urin empfinden und es einige Alternativen zu Globuli mit Urin gibt.

**Tabelle 11: SWOT-Analyse: Globuli**

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	nachhaltig, Naturprodukt, Weiternutzung von Abfallprodukten	teuer, geringe Akzeptanz
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Weiterdenken in der Alternativmedizin, Herstellung von Wirkstoffen die sonst nicht so leicht erhältlich sind	zu wenige Abnehmer, Ekel bei potentiellen Kunden trotz Aufbereitung, Unsicherheit bei Kunden, ob Produkt hält, was es verspricht

### Trinkwasser (in wasserarmen Ländern)

Niederländischen Wissenschaftlern ist es gelungen Trinkwasser aus Urin herzustellen. Der Urin wird hierbei in einem großen Tank gesammelt und in einem solarbetriebenen Kessel

erwärmt. Anschließend geht er durch eine Membran hindurch, wo das Wasser zurückgewonnen und Nährstoffe wie Kalium, Stickstoff und Phosphor getrennt werden (Bartunek, 2016).

Besonders in wasserarmen Ländern könnte die Stallbodenkonstruktion verwendet werden, um den gesammelten Urin aufzubereiten und anschließend als Trinkwasser für Tier und/oder Mensch bereitzustellen.

**Tabelle 12: SWOT-Analyse: Trinkwasser**

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	nachhaltig, innovatives Produkt, Weiternutzung von Abfallprodukten, Entstehung eines Kreislaufs	Derzeit nur für Pferdehaltungsbetriebe (Erweiterung auf Bauernhöfe), Energieverbrauch für Aufbereitung
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	könnte Wasserarmut in manchen Ländern entgegen wirken, Produkt entspricht dem Nachhaltigkeits-Trend	zu wenige Abnehmer, benötigte Energie nicht vorhanden

**Zusatz für Baumaterial**

Der gesammelte Pferdeurin könnte auch als Zusatzstoff für Baumaterial Verwendung finden. In diesem Zusammenhang hat nach Yoneda (2010) die amerikanische Architektin Ginger Krieg Dosier einen Ziegelstein aus Sand, Kalziumchlorid und Harnstoff namens „Biobrick“ erfunden. Dieser braucht nicht gebrannt zu werden. Bei der Herstellung herkömmlicher Ziegel benötigt man für 25.000 Ziegel ungefähr 3.200 MWh Energie.

Ebenso hat nach Hussey (2014) Peter Trimble ein Designstudent an der Universität Edinburgh, einen umweltfreundlichen Baustoff aus Sand geschaffen. Dem Sand werden Bakterien, Nährstoffe und Urin zugesetzt. Dieses Material erreicht rund 70 % der Festigkeit von Beton.

**Tabelle 13: SWOT-Analyse: Baumaterial**

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	nachhaltig, Weiternutzung von Abfallprodukten, umweltschonende Materialien	Qualität, Preis, aufwendige Aufbereitung, teuer
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Unternehmen könnte Pionier auf diesem Gebiet werden, Produkt entspricht dem Nachhaltigkeits-Trend	zu wenige Abnehmer, Baubranche lehnt Produkt ab, zu geringe Mengen für Weiterverarbeitung, Unsicherheit der Baubranche, ob Produkt hält, was es verspricht

**Injektionen mit sterilisiertem Urin (gegen Allergien), Bäder/Auflagen gegen Ekzeme (und ev. Fieberblasen)**

Der Harnstoff im Pferdurin könnte aufbereitet und für die Hautpflege bzw. gegen Neurodermitis und Ekzeme eingesetzt werden.

Viele Cremes für die dermatologische Anwendung enthalten nach Garbe und Orfanos (2002, 625) Harnstoff (Urea). Dieser erhöht die Wasserbindungskapazität der Epidermis und wird am häufigsten als Feuchthaltesubstanz in der Dermatologie verwendet. Bei der Behandlung von Neurodermitis kommt Harnstoff vor allem in den Konzentrationen 5% und 10% vor.

Dadurch Urea heutzutage üblicherweise synthetisch hergestellt wird, stellt sich die Frage ob sich Harnstoff aus Pferdeurin in diesem Fall überhaupt etablieren könnte.

Tabelle 14: SWOT-Analyse: Injektionen

SWOT-Analyse	Interne Analyse	
	Strengths (Stärken)	Weaknesses (Schwächen)
Externe Analyse	nachhaltig, natürliches Produkt, Weiternutzung von Abfallprodukten	Aufbereitung / Anreicherung teuer, synthetischer Urin hat sich schon etabliert
	Opportunities (Chancen)	Threats (Risiken)
	Aufbereiteter Pferdeurin könnte einen Teil des synthetisch hergestellten Urins ersetzen	Ekel, zu wenige Abnehmer, andere Anbieter bringen ähnliches Produkt günstiger auf den Markt, Unsicherheit bei Kunden, ob Produkt hält, was es verspricht

### 3.5 Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren

In Folge werden die verschiedenen Aufbereitungs- und Verwertungsverfahren erklärt, und es wird auf deren Wirtschaftlichkeit sowie Energieeffizienz eingegangen.

Der Pferdeurin ist reich an Nährstoffen, wie Stickstoff, Schwefel, Calcium und Kalium. Er kann nach der Aufbereitung als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt werden.

Für die Aufbereitung des Pferdeurins werden biologische, physikalische und chemische Verfahren in Betracht gezogen.

Berücksichtigt wird bei den biologischen Verfahren die Nitrifikation. Bei den physikalischen Verfahren werden die Destillation und Membranverfahren (Nanofiltration, Umkehrosmose) näher beschrieben. Und zu den chemischen Verfahren zählen Phosphorelimination, Elektrolyse, Elektrodialyse und Ozonierung.

Zwei weitere Verfahren sind nach Maurer (2007, 16) die Teilgefrierung und E-Stripping. Bei der Teilgefrierung wird der Urin so weit gefroren, dass ein Teil flüssig bleibt. In dieser flüssigen Phase befindet sich ein Großteil der Nährstoffe, während das Eis vor allem Wasser enthält.

Beim E-Stripping wird Ammoniak z.B. mit Luft aus dem Urin ausgetrieben und in eine Ammoniak- oder Ammoniumsulfatlösung überführt. Die zwei Lösungen können dann als chemische Rohstoffe oder Dünger verwendet werden (Maurer, 2007, 16).



Abbildung 6: Pilotanlage zur Urinaufbereitung, Eawag (Maurer, 2007, 21)

Etabliert hat sich die Aufbereitung des Urins zur Düngerherstellung mittels Nitrifikation und anschließender Destillation (siehe Abb. 7) oder die Herstellung von Struvit mittels Phosphorelimination.

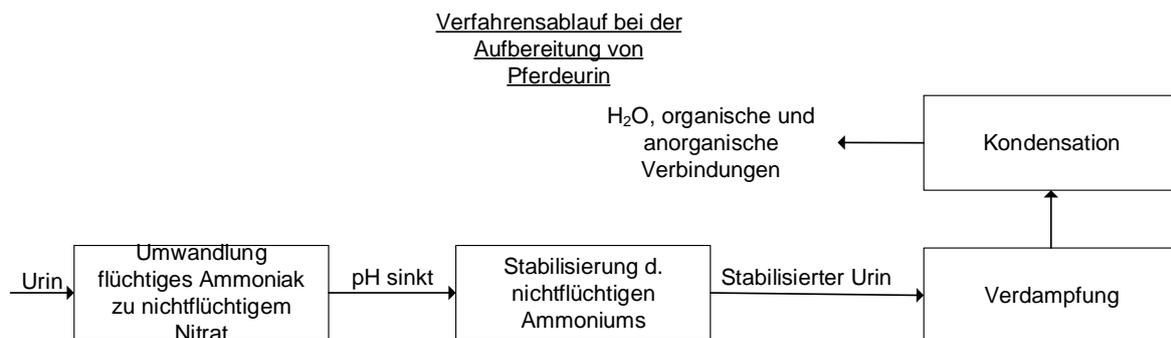


Abbildung 7: Fließbild Düngerherstellung (Nitrifikation → Destillation)

### 3.5.1 Nitrifikation

Der Urin enthält Bakterien, wodurch ein starker Geruch und hohe Konzentrationen flüchtigen Ammoniaks ( $\text{NH}_3$ ) entstehen. Die Nitrifikation ist ein biologisches Verfahren, mit dem der

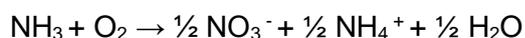
gesammelte Pferdeurin stabilisiert, Stickstoffverluste verhindert und der Geruch beseitigt werden kann (Etter et al., 2015, 8).

Um Ausgasung von Ammoniak und somit den Verlust von Stickstoff zu verhindern, muss der Urin vorbehandelt werden. An der Eawag wird seit 2012 eine Pilotanlage mit Nitrifikation als Vorbehandlung und anschließender Vakuumdestillation betrieben (siehe Abb. 3).



**Abbildung 8: Nitrifikationsanlage (Etter et al., 2015, 6)**

Nach Larsen und Lienert (2007, 12) werden in einem Reaktor Bakterien gezüchtet. Der Urin bleibt hierbei laut Udert et al. (2014, s.p.), je nach Abhängigkeit der Ammoniakkonzentration im Zulauf, zusammen mit den Bakterien, 3 – 6 Tage im Reaktor. Nach Udert und Wächter (2012, 1) werden durch die Nitrifikation rund 50 % des Ammoniaks in nichtflüchtiges Nitrat umgewandelt. Dies verhindert, dass Ammoniak verloren geht. Hierbei entsteht eine Säure, die den pH-Wert des Urins von über 9 auf etwa 6 senkt. Anschließend werden die anderen 50 % als nichtflüchtiges Ammonium stabilisiert.

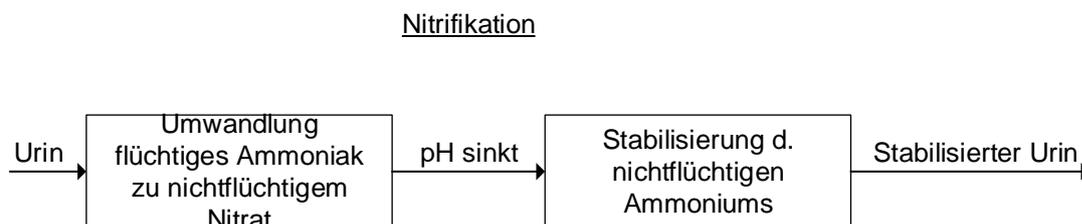


Hierbei teilen sich nach Etter et al. (2015, 8) zwei Bakteriengruppen die Arbeit. Ammoniak-oxidierende Bakterien produzieren Nitrit und Nitrit oxidierende Bakterien wandeln Nitrit in Nitrat um. Die organischen Substanzen, die für den Geruch verantwortlich sind, werden von Heterotrophen (dritte Bakteriengruppe) entfernt. Der Energieverbrauch beträgt während der Nitrifikation weniger als 50 Wh/L.

Die thermische Stabilität erhöht sich laut Etter et al. (2015, 10) bei vollständiger Nitrifikation zu Nitrat (durch Zugabe von Calciumcarbonat). Nach Etter et al. (2015, 8) muss der pH-Wert während der Nitrifikation in einem engen Bereich gehalten werden, um eine stabile Nitrifikation zu gewährleisten.

Bei einer Überlastung der Nitrifikationsanlage mit Urin wird toxisches Nitrit erzeugt und bei einer Unterbeladung wird Säure produziert, die nitrifizierende Bakterien schützt.

Bei diesem Verfahren wird laut Larsen und Lienert (2007, 12) eine Ammoniumnitrat- oder Ammoniumnitrit-Lösung gewonnen. Ammoniumnitrat ist ein Handelsdünger, Ammoniumnitrit dagegen ist für Bodenorganismen giftig. Ammoniumnitrit kann aber durch chemische Oxidation mit Sauerstoff bei einem tiefen pH-Wert in Nitrat oder in einem weiteren biologischen Prozess in Stickstoffgas und Wasser umgewandelt werden. Für die Nitratproduktion eignen sich vor allem kontinuierlich beschickte Durchlaufreaktoren (Udert und Wächter, 2012).



**Abbildung 9: Fließbild Nitrifikation**

Das Endprodukt der Nitrifikation ist nach Etter et al. (2015, 8) stabilisierter Urin.

### 3.5.2 Destillation

Eine Alternative zur Nitrifikation stellt die Säurezugabe (z.B. von Schwefelsäure) zu frischem Urin dar. Mit Hilfe der Säure kann die Harnstoffhydrolyse ebenfalls verhindert werden (Hellström et al., 1999).

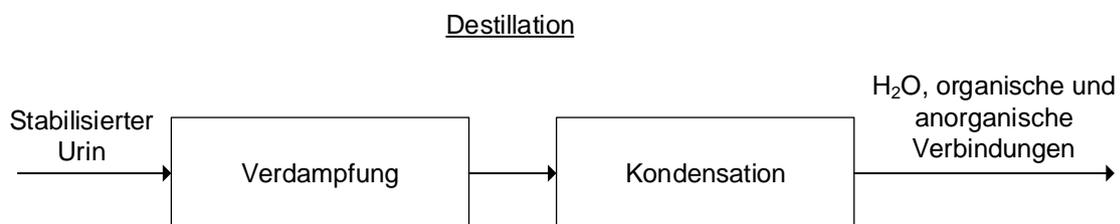
Nachdem der Urin im Nitrifikationsprozess oder mittels Säurezugabe stabilisiert wurde, wird er nach Etter et al. (2015, 10) destilliert, um Nährstoffe im Urin rückzugewinnen, das Volumen zu reduzieren und dadurch Lagerungs- und Transportkosten einzusparen.

Die Destillation stellt nach Nikolaus und Ripperger (2008, 1277) das meistverbreitete und am weitesten entwickelte Trennverfahren dar. Hierbei wird der Urin zuerst verdampft und anschließend der Dampf wieder kondensiert. Beim Destillieren gehen flüchtige und verschiedene organische und anorganische Verbindungen in das Destillat über (Meissner, 2013, 1166).

Nach Jamieson (2013, 50) wird dieses Verfahren zur Entsalzung von Meerwasser, aber auch für die Aufbereitung von Wasser aus Urin angewendet, z.B. in der International Space Station ISS.

Laut Udert und Wächter (2012) haben Laborversuche mit synthetischem Urin gezeigt, dass je nach pH-Wert ca. 1,5 % (pH 6) bis 3,0 % (pH 7,2) des Stickstoffs während der Destillation ausgasen. Laut Etter et al. (2015, 11) können ca. 97 % des Wassers entfernt werden, doch Salze bleiben in der Lösung. Das erste Salz, das ausgefällt werden konnte, war Natriumchlorid. Bei schrittweiser Destillation konnten 50 % davon entfernt werden, ohne, dass Nährstoffe verloren gingen. Ebenso ist die Herstellung eines Festproduktes möglich, bedarf aber besonderer Apparaturen, weil Ausfällungen in Vakuumdestillationsanlagen problematische Verkrustungen verursachen (Udert und Wächter, 2012).

Im Kondensat wurden laut Etter et al. (2015, 11) neben Ammoniak nur Spuren von Kohlendioxid und organischen Substanzen gefunden. Diese konnten durch „Strippen“ (die Substanz wird aus der flüssigen Phase durch Desorptionsvorgänge in die Gasphase übergeführt) entfernt und dadurch destilliertes Wasser hergestellt werden.



**Abbildung 10: Fließbild Destillation**

Laut Nikolaus und Ripperger (2008, 1277) handelt es sich bei der Destillation durch den Einsatz von Wärmeenergie um ein sehr zeit- und energieintensives Trennverfahren.

Bei Umgebungstemperatur und -druck werden für die Eindampfung rund 700 Wh/L thermische Energie benötigt (Udert und Wächter, 2012). Nach Udert (2017) konnte dieser Energiebedarf auf 107 Wh/L elektrische Energie gesenkt werden. Theoretisch und praktisch wäre mithilfe einer Vakuumdestillationsanlage mit Brüdenkompression (Versuchsanlage an der Eawag) ein Energieverbrauch von nur 80 Wh/L möglich.

Um den erforderlichen Energieaufwand weiter zu verringern, können nach Nikolaus und Ripperger (2008, 1277) die Trennwandkolonnen-Technologie oder intern wärmeintegrierte Destillationskolonnen (HIDiC) zum Einsatz kommen. Mithilfe der intern wärmeintegrierten Destillationskolonnen (HIDiC) sind durch Dampfkompensation und diabatische Arbeitsweise Destillationen bei sehr geringem Energieaufwand nahe dem theoretischen Minimum möglich.

Das Wasserforschungsinstitut Eawag hat herausgefunden, dass man die erforderliche Energiemenge durch Energierückführung, zum Beispiel durch Dampfkompensation und Hitzaustausch, relativ niedrig halten kann (Etter et al., 2015, 10).

Nach Etter et al. (2015, 11) kam die Sicherheitsbewertung zu dem Schluss, dass bei der Herstellung von festem Ammoniumnitrat eine maximale Betriebstemperatur von 96 ° C verwendet werden sollte. Bei der Herstellung einer flüssigen Ammoniumnitratlösung (165 ° C) können jedoch höhere Betriebstemperaturen verwendet werden. Dasselbe gilt wenn nahezu der gesamte Ammoniak mithilfe der Basendosis zu Nitrat nitrifiziert werden soll.

Laut Etter et al. (2015,11) erhält man nach der Destillation destilliertes Wasser und eine braune Flüssigkeit (Primärdünger), in der neben der Stickstoffverbindung auch die anderen Nährstoffe enthalten sind. Diese Flüssigkeit ist als Dünger einsetzbar.

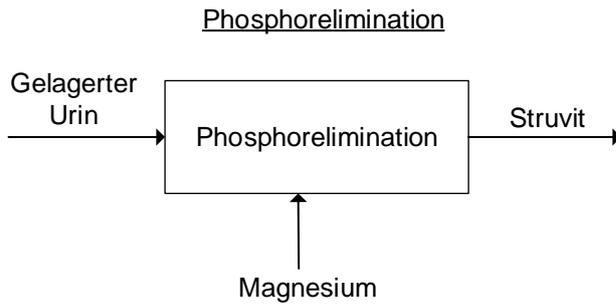
### 3.5.3 Phosphorelimination

Novaquatis untersuchte laut Larsen et al. (2007,12) das Verfahren, um Struvit (ein Magnesium-Ammonium-Phosphat,  $MgNH_4PO_4$ , oder MAP) aus Urin herzustellen.



**Abbildung 11: Phosphoreliminationsanlage (Larsen und Lienert, 2007, 13)**

Durch Beifügen einer löslichen Magnesiumquelle (z. B. Magnesiumsalze, wie Magnesiumchlorid oder Magnesiumoxid) oder durch hohe pH-Werte (aufgrund langer Lagerungszeiten) kann nahezu der gesamte Phosphor in Form von schwer löslichen phosphorhaltigen Salzen aus dem Urin ausgefällt werden. Durch dieses Fällungsverfahren wird mithilfe einer chemischen Reaktion fester Struvit aus der Urinlösung erzeugt. Die Magnesiumdosierung kann durch Verwendung von Trübungs- oder elektrischen Leitfähigkeitssignalen gesteuert werden (Etter und Udert, 2015, 14).



**Abbildung 12: Fließbild Phosphorelimination**

Struvit ist nach Maurer (2007, 16) ein bewährter, langsam wirkender Mehrkomponentendünger. Außerdem kann Struvit zwei abwasserrelevante Nährstoffe, nämlich Phosphor und Stickstoff in einen einzigen Feststoff überführen.

Die Struvit-Rückgewinnungsrate hängt laut Etter und Udert (2015, 14) davon ab, wie effizient die Filtration Feststoffe von der Flüssigkeit trennt. Probleme hierbei stellen eine langsame Filtration, verstopfte Filter und die richtige Dosierung von Magnesium (wenn die Phosphorkonzentration im Urin unbekannt ist) dar.

Der Grad, zu dem sich Phosphor eliminieren lässt, hängt im Wesentlichen auch von der Verdünnung ab und erreicht in der Regel 98%. Das Produkt ist anschließend weitgehend frei von Pharmazeutika und Hormonen, außerdem konnten auch keine Schwermetalle nachgewiesen werden (Larsen et al. 2007,12).

Laut Etter und Udert (2015, 14) kann die Phosphorelimination auch in Gebieten ohne Stromversorgung angewendet werden, da der Prozess manuell betrieben werden kann. Der Prozess kann auch automatisiert werden, um eine effizientere Magnesiumdosierung zu ermöglichen.

Durch Struvitfällung können mehr Schadstoffe entfernt werden, als durch Nanofiltration und Ozonierung. Hiermit können 98% der hormonaktiven und zelltoxischen Mikroverunreinigungen entfernt werden. Somit entsteht ein sehr sauberer Dünger (Escher, 2007, 24).

Struvit kann somit aus gelagertem Urin gewonnen und als fester Phosphordünger verwendet werden (Etter und Udert, 2015, 14).



**Abbildung 13: Struvit (Larsen und Lienert, 2007, 13)**

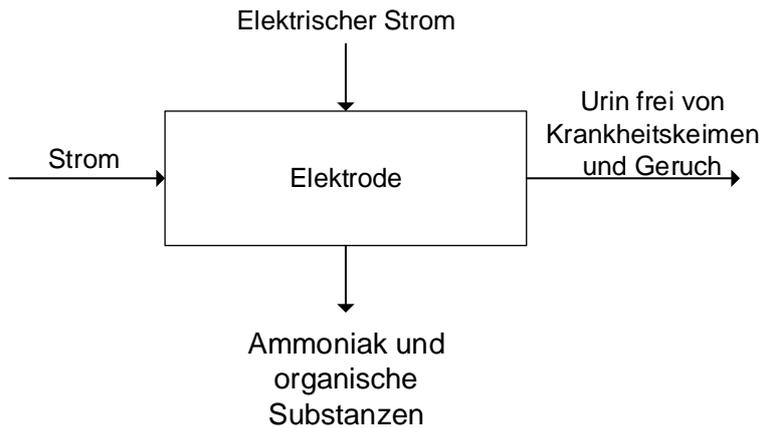
### **3.5.4 Elektrolyse**

Nach Etter et al. (2015, 12) erfolgt bei der Elektrolyse die Elektronenübertragung an der Oberfläche einer Elektrode, sobald eine Energiequelle die erforderliche Energie liefert. Elektrischer Strom treibt die Umwandlung bestimmter chemischer Verbindungen in neue Verbindungen an. Der Transport der Reaktanten zur Elektrodenoberfläche konnte durch Optimierung der hydraulischen Bedingungen in Elektrolysezellen beschleunigt werden (Etter et al. (2015, 13).

Laut Etter et al. (2015, 12) können mithilfe der Elektrolyse Ammoniak und organische Substanzen schnell aus dem Urin entfernt werden. Außerdem kann mit der elektrochemischen Magnesiumdosierung effizient Phosphor gewonnen werden. Die biologische Nitrifikation wird robuster, wenn Nitrit elektrochemisch kontrolliert wird.

Besonders für die dezentrale Urinbehandlung in kompakten Einheiten eignet sich die Elektrolyse und bietet einige Vorteile. Die Umwandlungsprozesse passieren schnell, die Technik ist zuverlässig und die Prozesse können durch eine angegebene Stromstärke oder eine angegebene Spannung kontrolliert werden (Etter et al. 2015, 12).

Eine echte Herausforderung laut Etter et al. (2015,12) kann die Umwandlung ungewollter in gewollte Substanzen sein. Die Folgen von unerwünschten Prozessen können Energieverluste oder die Entstehung schädlicher Nebenprodukte sein.



**Abbildung 14: Fließbild Elektrolyse**

Nach Etter et al. (2015, 12) konnten drei Anwendungen der Elektrolyse für die Urinbehandlung überprüft werden. Getestet wurde die elektrochemische Oxidationskapazität von

- bordotierten Diamantelektroden (BDD)
- Iridiumoxiden ( $\text{IrO}_2$ ) und
- Graphitelektroden, um Ammoniak und organische Substanzen abzubauen.

Bei der Anwendung von BDD- und  $\text{IrO}_2$ - Elektroden wurden durch zu hohe Spannungen schnell Verschlechterungen erreicht. Graphitelektroden waren jedoch in der Lage, Ammoniak bei niedrigen Spannungen zu entfernen. Vorteile hierbei waren die niedrigen Elektrodenkosten, reduzierte Energienachfrage, das Fehlen von Chlornebenprodukte und der Erfolg beim Stabilisieren der Nitrifikation (Etter et al., 2015, 13).

Das Ziel dieses Prozesses war nach Etter et al. (2015, 12), Umweltverschmutzung und starken Geruch zu verhindern. Die Kombination einer Graphitelektrode mit einer biologischen Nitrifikationsanlage konnte den Nitrifikationsprozess stabilisieren, da überschüssiges Nitrit elektrochemisch abgebaut wird. Zudem wurde eine metallische Magnesiumelektrode mithilfe der Elektrolyse aufgelöst, um den Stuvit Ausfällungsprozess fein abzustimmen. Die Elektrode verabreichte bei dem konstanten elektrischen Potential genau das vom Prozess benötigte Maß an Magnesium. Ein großer Nachteil hierbei ist die Produktion von schädlichen Chlornebenprodukten und ein hoher Energieverbrauch (Etter et al. 2015, 13).

Durch den verbesserten Transport der Reaktanten und spezialisierten Elektroden können nach Etter et al. (2015, 13) der Energieverbrauch und die Produktion unerwünschter Nebenprodukte reduziert werden. Jedoch gibt es immer noch viel Potential für Verbesserungen bezüglich Elektrolyse für die Urinbehandlung.

Bei der Elektrolyse werden nach Udert und Hug (2012, 294) hauptsächlich der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) verringert und Ammonium abgebaut. Die Lösung wird dadurch auch desinfiziert. Nach der Elektrolyse ist das Wasser frei von Krankheitskeimen.

Bei der elektrochemischen Struvitausfällung wird Struvit produziert.

**Tabelle 15: Vergleich von IrO<sub>2</sub>, BDD und Graphit (Etter et al., 2015, 13)**

Kennzahlen		IrO <sub>2</sub>	BDD	Graphit
Maximale tägliche organische Substanzeeliminierung (in COD)	<i>g/m<sup>2</sup></i>	670	1300	0
Maximale tägliche Stickstoffeliminierung	<i>g/m<sup>2</sup></i>	460	170	3
Energieverbrauch (pro Gramm abgebautem Stickstoff)	<i>Wh/g</i>	82	160	42
Gegenwärtige Leistungsfähigkeit der Stickstoffeliminierung	%	21	14	33

### 3.5.5 Membranverfahren

Membranverfahren haben für die Aufbereitung von Urin drei Ziele: Zuerst werden die organischen Mikroverunreinigungen von den Nährstoffen getrennt, anschließend wird die Nährstofflösung konzentriert (Volumenreduktion) und zum Schluss werden Bakterien und Viren abgetrennt oder zerstört (Larsen und Lienert, 2007, 13). Membranen besitzen laut Melin und Rautenbach (2004, 1) eine Struktur, die für mindestens eine Komponente eines sie berührenden Gases oder einer Flüssigkeit permeabel und für andere undurchlässig ist.

Nachstehend werden zu den Membranverfahren die Nanofiltration und die Umkehrosrose näher behandelt.

#### 3.5.5.1 Nanofiltration

Bei der Nanofiltration werden Stoffe in Molekülgröße abgetrennt. Hierbei werden Flüssigkeiten unter einem hohen Druck von ungefähr 10 – 30 bar durch eine Membran mit Poren im Nanometerbereich gepresst. Dabei werden die in der Flüssigkeit gelösten Stoffe aufgrund ihrer Molekülgröße und Ladung getrennt (Pronk et al., 2006).

Die Nanofiltration funktioniert nach Larsen und Lienert (2007, 13) nur, wenn der Harnstoff im Urin nicht abgebaut wird.

In einem Laborversuch der Eawag wurden nach Pronk et al. (2006) drei verschiedene Membranen, die Stoffe mit Molekulargewichten größer als 150 – 400 Dalton (Da) zurückhalten sollten, getestet.

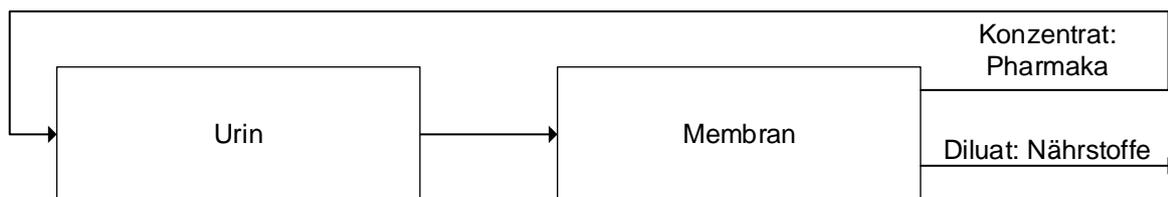
Die Membran NF270 (Hersteller Dow Inc.) schnitt laut Pronk et al. (2006) am besten ab. Mit dieser Membran konnten aber nicht alle Schadstoffe zurückgehalten werden. Für Phosphat

war die Membran durch abstoßende Kräfte zwischen Membran und gelösten Stoffen fast undurchdringlich, und nur ungefähr die Hälfte des Ammoniums konnte passieren. Ungeladene Harnstoffmoleküle konnten dagegen die Membran passieren.

Mit Hilfe der Nanofiltration lässt sich laut Larsen und Lienert (2007, 13) aus Urin eine Harnstofflösung ohne Phosphor herstellen. Ein großer Teil der organischen Mikroverunreinigungen kann von den Nährstoffen getrennt werden, außerdem werden Bakterien und Viren entfernt. Anschließend ist die Lösung weitgehend unbedenklich. Die Nährstoffe werden bei der Nanofiltration nicht konzentriert.

Daher eignet sich die Nanofiltration nur bedingt für eine vollständige Nährstoffrückgewinnung, dafür lässt sich eine Flüssigkeit mit gelöstem Harnstoff gewinnen. Nach der Verdunstung bleibt ein Feststoff übrig, der an die Industrie verkauft werden kann (Thomsen, 2014).

#### Nanofiltration

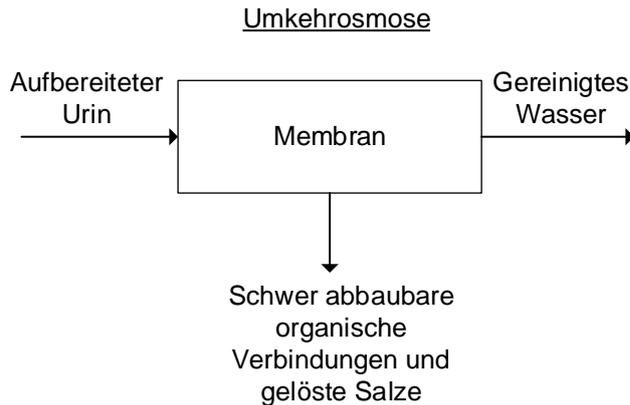


**Abbildung 15: Fließbild Nanofiltration**

#### **3.5.5.2 Umkehrosmose**

Die Umkehrosmose eignet sich laut Melin und Rautenbach (2004, 3) zum beinahe vollständigen Rückhalt der gelösten Stoffe. Es werden ebenfalls Membranen verwendet, und der transmembrane Druck stellt die Triebkraft der Trennung dar.

In diesem Prozess werden die gelösten Anteile an Phosphor und Kalium zu ungefähr 80 % zurückgewonnen. Bei der Umkehrosmose werden biologisch schwer abbaubare organische Verbindungen und gelöste Salze entfernt. Das so gereinigte Wasser kann in einen Vorfluter eingeleitet oder als Brauchwasser genutzt werden (Gethke-Albinus, 2012, 75).



**Abbildung 16: Fließbild Umkehrosmose**

Der Einsatz von Membrantechnik und insbesondere der Umkehrosmose im Medium Pferdeurin ist eher problematisch, da Pferdeurin eine klebrige, zähflüssige Konsistenz aufweist. Dadurch verstopfen die Membranen in kürzester Zeit, und die Anzahl der notwendigen Reinigungsintervalle erhöht sich (Gethke-Albinus, 2012, 86). Nach der Umkehrosmose erhält man gereinigtes Wasser.

### 3.5.6 Elektrodialyse

Bei der Elektrodialyse werden ionische Komponenten aus wässrigen Lösungen über Ionenaustauschermembranen mit Hilfe von elektrischer Spannung voneinander getrennt (Hell, 2005, 2). Hierbei befinden sich nach Melin und Rautenbach (2004, 3) abwechselnd positiv und negativ geladene, durchlässige Membranen zwischen einem Elektrodenpaar. Diese können von geladenen Molekülen mit einer Größe von bis zu 200 Da passiert werden. Anionen (negativ geladene Ionen) bewegen sich zur Anode und Kationen (positiv geladene Ionen) zur Kathode. Umgekehrt können die Kationen nicht die negativ geladenen Membranen und die Anionen nicht die positiv geladenen Membranen passieren.

Zum Schutz der Membranen wird eine Ultrafiltration vorgeschaltet. Die Nährstoffe werden um den Faktor 4 aufkonzentriert. Anschließend sind keine Spurenstoffe mehr nachweisbar (Maurer, 2007, 29).

Das Rohwasser wird nach Hell (2005, 2) in einen Diluat- und in einen Konzentratstrom geteilt. In den Diluat-Kompartimenten werden die Stoffe entfernt und in den Konzentrat-Kompartimenten angereichert. Der Urin wird in die Diluat-Kompartimente eingespeist (Pronk et al., 2006).

## Elektrodialyse



**Abbildung 17: Fließbild Elektrodialyse**

Die Elektrodialyse bietet nach Hell (2005, 1) den Vorteil einer sehr selektiven Nitratentfernung; dies ermöglicht eine Verwertung des Konzentrates. Außerdem werden bei der Elektrodialyse Nähr- und Schadstoffe fast vollständig separiert. Ammonium, Phosphor und Kalium können von Mikroverunreinigungen und von Mikroorganismen getrennt werden. Die Nährstofflösung wird dabei etwa vierfach konzentriert. Pronk et al. (2006) gehen davon aus, dass sich die Elektrodialyse besser für die Nährstoffrückgewinnung eignet als die Nanofiltration.

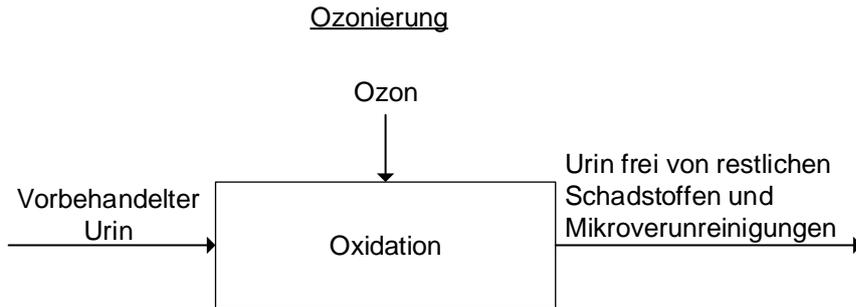
Das Ergebnis der Elektrodialyse ist eine konzentrierte Nährstofflösung.

### **3.5.7 Ozonierung**

Mithilfe des chemischen Prozesses der Ozonierung können nach Pronk et al. (2008) die restlichen Schadstoffe und Mikroverunreinigungen eliminiert werden, die durch die vorherigen Prozesse wie z.B. Elektrodialyse nicht entfernt werden konnten.

Bei der Ozonierung werden sehr hohe Ozondosen zur Entfernung von Mikroverunreinigungen gebraucht. Urin enthält meist große Mengen von Arzneimitteln, Hormonen und natürlicherweise organische Substanzen. Bei Anwendung einer Ozondosis von 1,1 g/L Urin werden die organischen Stoffe so stark oxidiert, dass die Hormonaktivität vollständig verloren geht. Dabei werden aber nicht alle zelltoxischen Stoffe komplett zerstört. Die Zelltoxizität konnte aber in Tests um etwas mehr als 50% reduziert werden (Escher, 2007, 24).

Gemeinsam mit dem Amt für industrielle Betriebe Baselland (AIB) führte die Eawag Versuche durch, in denen die Elektrodialyse mit der Ozonierung kombiniert werden sollte (Pronk et al., 2008). Hierbei wurden zwei verschiedene Verfahrenskombinationen angewandt: einmal die Ozonierung des Rohurins vor der Elektrodialyse und einmal die Ozonierung des Diluats und des Konzentrats nach der Elektrodialyse. Die Methode mit der anschließenden Ozonierung benötigt laut Pronk et al. (2008) insgesamt weniger Energie und Ozon.



**Abbildung 18: Fließbild Ozonierung**

Die Eawag konnte in Versuchen feststellen, dass Arzneimittel durch Oxidation mit Ozon weitgehend zerstört werden konnten. Weiterführende Labortests nach Pronk et al. (2008) ergaben, dass dies für den durch die Elektrodialyse behandelten Urin ebenfalls möglich ist. Hierfür benötigt man aber eine Ozondosis von 1 – 2 g Ozon pro Liter Urin; diese Dosis ist höher als bei anderen Anwendungen.

### 3.6 Düngerherstellung

Ausfällung von Struvit ist laut Etter et al. (2015, 14) ein bekannter Prozess zur Wiederherstellung des Phosphors aus Urin. Während einer chemischen Reaktion produziert der Ausfällungsprozess festes Struvit aus dem Urin. Diese Reaktion wird durch Hinzufügen einer löslichen Magnesiumquelle (z.B. Magnesiumsalze wie Magnesiumoxid oder Magnesiumchlorid) ausgelöst. Hierbei kann beinahe der gesamte Phosphor aus dem Urin ausgefällt werden (Etter et al., 2015, 14).

Das Wasserforschungsinstitut Eawag hat nach Etter et al (2015, 14) eine manuell betriebene Struvit-Ausfällungs-Anlage mit einem Fassungsvermögen von 40 Litern für Nepal entwickelt. Es wurden Filterbeutel verwendet, um die Struvit-Kristalle, welche ein bis zwei Wochen in Umgebungsluft getrocknet wurden, zu trennen.

An der Universität von KwaZulu-Natal wurde nach Etter et al. (2015,15) eine automatisierte Anlage mit einem Fassungsvermögen von 50 Litern entwickelt. Hierbei wurde Magnesium in Echtzeitsignalen entsprechend den Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit oder Trübung verabreicht. Bei vollständiger Ausfällung wurden die Struvit-Kristalle in einem Filtrationsmodul, das eine Baumwollfaser enthält, wiederhergestellt.

Die Vorteile der manuellen Anlage liegen in der leichten Handhabbarkeit; außerdem wird keine Elektrizität dafür benötigt, somit ist sie auch in abgelegenen Regionen anwendbar. Jedoch ist der Prozess sehr arbeitsintensiv und kann durch unpräzises Verabreichen von Magnesium leichter ineffizient werden (Etter et al., 2015,15).

Nach Etter et al. (2015, 15) zeigten die Studien, dass Automatisierung und sensorgesteuerte Magnesiumdosierung dazu verwendet werden können, effizientere Anlagen zu bauen. Dies würde allerdings Elektrizität sowie Personal, das ein größeres Verständnis von dem Prozess hat, erfordern. Die Filterung von Struvit-Kristallen bleibt weiterhin eine Herausforderung.

Landwirtschaftliche Prüfungen zeigten, dass ausgefälltes Struvit von gespeichertem Urin die gleichen Leistungen wie synthetischer Dünger bringt. Jedoch ist Struvit-Ausfällung nur ein Prozess zur Wiederherstellung von Phosphor. Außerdem enthält Struvit ansteckende Krankheitserreger, die während der Trocknung nur teilweise entfernt werden können (Etter et al., 2015, 15).

Ebenfalls hat sich die Aufbereitung des Urins zur Düngerherstellung mittels Nitrifikation und anschließender Destillation bewährt. Arzneimittelrückstände können im Anschluss mithilfe von Aktivkohlefiltern oder Ozonierung entfernt werden (Etter et al., 2015, 6).

## 4 Methode

### 4.1 Praktische Umsetzung

Durch die Lagerung des Urins reichert sich Ammoniak an und der pH-Wert steigt. Somit kann der Pferdurin vor der Destillation stabilisiert werden. Dabei soll der pH-Wert auf einen Wert von 4 bis 6 sinken. Dies erfolgt durch die Zugabe einer starken Säure. Hierfür kann Schwefelsäure in einer Konzentration von 2,9 g/l verwendet oder der Urin mittels Nitrifikation stabilisiert werden.

Mithilfe von Messstreifen kann der pH-Wert des Urins vor und nach der Säurezugabe bestimmt werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde nur mit dem reinen Urin ohne Säurezugabe gearbeitet.

#### 4.1.1 Der Destillationsvorgang

Verwendet wurde das Labor-Vakuumsystem „MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex“ der Firma WELCH (vormals ILMVAC) und der Rotationsverdampfer „LABOROTA 4000 efficient“ der Firma Heidolph. In *Abb. 19* wird die verwendete Anlage inklusive Beschriftung der Anlagenteile dargestellt. Im Anschluss werden einige relevante Parameter sowie Anwendungsmodi aufgezeigt.

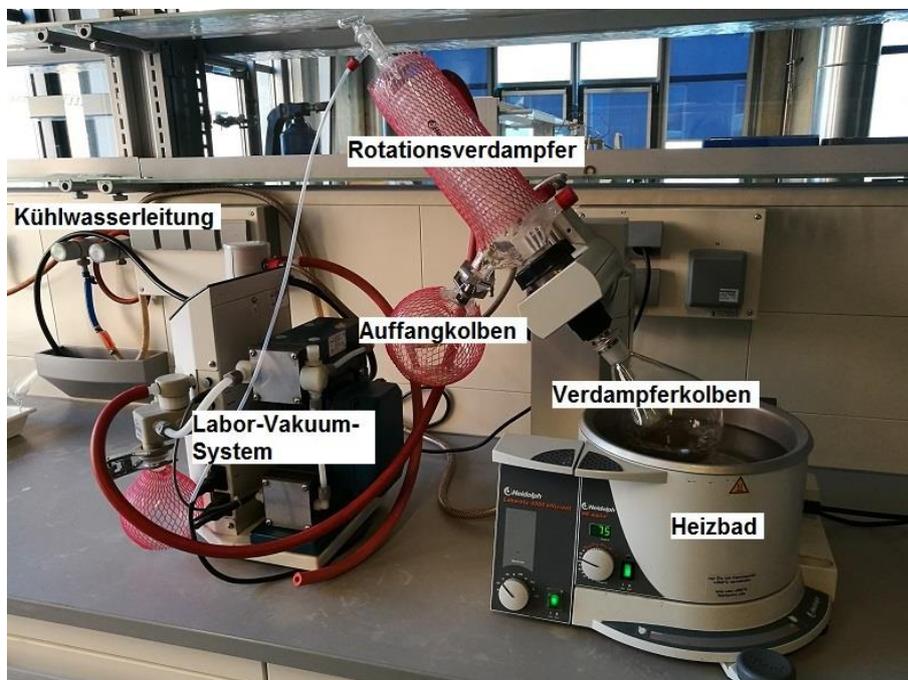


Abbildung 19: Destillationsanlage

**Tabelle 16: Parameter, MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex (Welch, 2016, 18)**

Parameter	Einheit	LVS – MPC 201 Tp.
Saugvermögen 50/60 Hz DIN 28432 bei Drehzahl 1500 min <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> /h	2,2
Enddruck bei Drehzahl 1500 min <sup>-1</sup>	mbar	< 2
Enddruck mit Gasballast bei Drehzahl 1500 min <sup>-1</sup>		9
Max. Eingangsdruck	bar	1
Max. Auslassdruck		1
Saug-/ Druckstutzen	-	Schlauchwelle DN 8 für Schlauchinnendurchmesser 8 mm
Umgebungstemperatur	°C	+ 10 bis + 40
Max. Betriebstemperatur		+ 60
Lager	-	wartungsfrei
Messflächen- Schalldruckpegel DIN EN ISO 2151	db (A)	< 44
Spannung, Frequenz	V, Hz	230, 50/60 (115, 50/60) (generell mit Motorschutz, Schalter und Kabel)
Leistung	W	90
Betriebsart	-	S 1
Schutzart DIN EN 60529		IP 54
Motor / Isolierklasse DIN EN 600034-1		F (160 °C)

**Tabelle 17: Parameter, LABOROTA 4000 efficient (Heidolph, 2008, 33)**

Parameter	Einheit	LABOROTA 4000 efficient
Antrieb	-	Kondensatormotor mit elektronischer Drehzahlregelung
Drehzahlbereich	min	20 – 270
Drehzahlkontrolle		Skala
Antrieb Lift	-	von Hand
Hubgeschwindigkeit		von Hand
Hubweg	mm	140
Heizleistung	W	1300
Temperaturbereich Heizbad		20 – 100
Regelgenauigkeit Heizbad		± 2,5
Anschlussspannung	-	230V/50/60Hz
Anschlussleistung	W	1400
zulässige Umgebungsbedingungen	-	0 – 40 °C bei 80 % rel. Luftfeuchtigkeit
Verdampfungsleistung	ml H <sub>2</sub> O/h	ca. 1000
Kühlfläche	cm <sup>2</sup>	1200

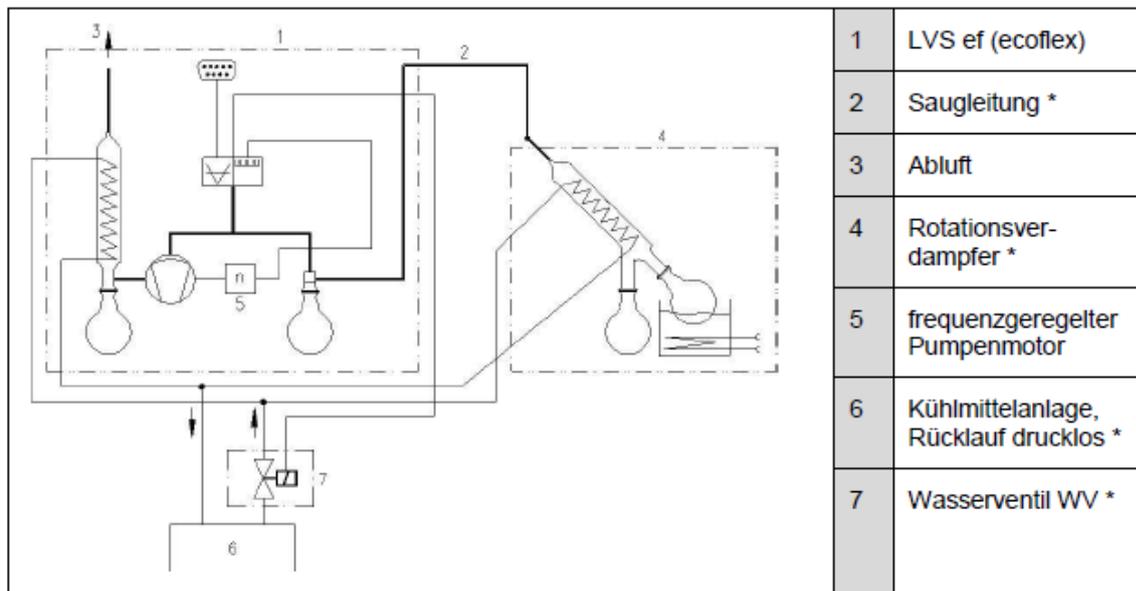


Abbildung 20: Anwendungsbeispiel - LVSp ecoflex

Tabelle 18: Anwendungsmodi, LVS - MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex

Modus	Funktion	Erforderliche Parameter	Einheit
1	Unterdruck entsprechend dem eingestellten Sollwert	PS - Sollwert	mbar
2	Unterdruck entsprechend dem eingestellten Sollwert plus zusätzliche Druckreduzierung im Verhältnis PL : tL	PS - Sollwert PL - Menge der Druckreduktion tL - Zeit für die Druckreduktion	mbar min mbar
5	Erforderlicher Unterdruck nach automatischer Sollwertvorgabe	Keine	-
6	Erforderlicher Unterdruck nach automatischer Sollwertvorgabe plus zusätzliche Druckreduzierung im Verhältnis PL : tL	PL - Menge der Druckreduktion tL - Zeit für die Druckreduktion	mbar min

<b>Modus 1:</b>	
1	Die Betriebsart mit den Pfeiltasten einstellen
2	Halte die (OK) Taste für 3 Sekunden gedrückt
3	Verwenden Sie die Pfeiltasten (RAUF/RUNTER) um die Parameter einzustellen
4	Aktivieren Sie die Parametrierung, indem Sie wiederholt (OK) drücken
5	Stellen Sie mit den Pfeiltasten (RAUF/RUNTER) den gewünschten Wert ein und drücken Sie (OK) zur Bestätigung
6	Übertragen der eingegebenen Werte in den Speicher durch (STOP)
7	Starten Sie den Regler (START)
<b>Modus 2:</b>	
1	Verfahren analog zu Modus 1
<b>Modus 5:</b>	
1	Übertragen Sie die eingegebenen Werte in den Speicher durch (STOP)
<b>Modus 6:</b>	
1	Verfahren analog zu Modus 1
<b>Korrigieren der definierten Sollwerte während der aktiven Steuerung</b>	
1	Mit den Pfeiltasten (RAUF/RUNTER) den gewünschten Druck einstellen
2	Drücken Sie (OK) um den angezeigten temporären Wert in den Speicher der Steuerung zu übertragen

### **Abbildung 21: Einstellbare Modi - MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde hauptsächlich mit der Einstellung aus Modus 5 gearbeitet. Hierbei stellte sich automatisch ein Druck von 215 – 216 mbar ein. Dieser wurde mithilfe der Pfeiltaste manuell nachgeregelt.

Zu Beginn der Destillation muss das Heizbad mit einem geeigneten Medium aufgefüllt werden. Im Zuge der praktischen Versuche wurde das Heizbad mit Leitungswasser aufgefüllt. Mindest- und Maximalfüllhöhe sind am Innenrand durch Markierungen gekennzeichnet. In weiterer Folge wurde das Kühlwasser aufgedreht.

Danach kann die Betriebsbereitschaft von Heizbad und Rotationsverdampfer mittels der Hauptschalter hergestellt werden. Die Rotationsdrehzahl und die Heizbadtemperatur wurden manuell eingestellt.

Abschließend wurde das Labor-Vakuum-System LVS „MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex“ durch den am Gerät installierten Kippschalter eingeschalten. Nach einer kurzen Initialisierungsroutine ist das Gerät einsatzbereit. Mithilfe der Pfeiltasten konnten nun die gewünschte Betriebsart eingestellt und durch Drücken der „START“-Taste in Gang gesetzt werden.

#### **4.1.2 Praktische Versuche**

Bei allen Versuchen wurden 200 ml gelagerter Pferdeurin verwendet. Vor jedem Versuch wurde der pH-Wert mittels pH-Indikatorstäbchen (Skala von 0 – 14) ermittelt. Hierbei wurde jedes Mal ein pH-Wert von 8 festgestellt (siehe Abb. 22). Im Zuge dieser Versuche wurde nur reiner Urin ohne Schwefelsäurezugabe verwendet.



**Abbildung 22: Messung des pH-Wertes**

Der folgende Vorgang wurde zu Beginn bei allen 7 Versuchen durchgeführt.

Das Heizbad wurde zunächst mit Leitungswasser befüllt, anschließend der Urin in den Verdampferkolben eingefüllt und mit der Dampfdurchführung verbunden. Fixiert wurde das Ganze mithilfe einer Kolbenklemme. Im Anschluss wurde der Zulauf für die Kühlflüssigkeit geöffnet und alle Kippschalter eingeschaltet. Danach konnte mit der Regelung der Rotationsgeschwindigkeit, der Heizbadtemperatur und des Drucks begonnen werden.

Der Verdampferkolben konnte nun ins Heizbad eingetaucht werden. Hierbei wurde der Kolben so weit eingetaucht, dass die Flüssigkeit im Kolben gerade vom Wasser im Heizbad bedeckt war. Anschließend wurde „Modus 5“ des Labor-Vakuum-Systems gestartet. Nach automatischer Druckeinstellung wurde der Druck manuell auf 200 mbar nachgeregelt.

**Tabelle 19: Versuch Nr. 1**

Versuch Nr. 1	
Datum	23.02.2017
Ausgangssubstanz	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
Menge (ml)	200
pH-Wert	8
Heizbadtemperatur (°C)	68
Rotation (Umdrehungen/min)	In den ersten Minuten 30, danach 60
Druck (mbar)	200
Start	10:12
Ende	13:49
Endsubstanz	Flüssigdünger
Menge (ml)	15
Menge (g)	12,87

In Versuch Nr. 1 wurde zu Beginn eine Temperatur von 50 °C eingestellt. Dabei begann der Urin leicht zu schäumen und nach 12 Minuten, bei 75 °C, zu kochen. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Temperatur wieder auf 65 °C zurückgestellt. Ab 65 °C begann die Ausgangssubstanz zu verdampfen, und es bildete sich destilliertes Wasser im Auffangkolben. Nach 20 Minuten wurde Schaum im Kühler, beim Übergang zum Verdampferkolben, erzeugt. Dieser konnte durch Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit auf 60 Umdrehungen/min und Reduzierung der Heizbadtemperatur auf 55 °C vermindert werden.

Bei 63 °C hörte die Ausgangssubstanz auf zu verdampfen. Daher wurde die Temperatur wieder auf 65 °C hochgestellt. Im Anschluss wurde sie ungefähr im 10-Minuten-Takt jeweils um 2 °C erhöht, bis sie schließlich 84 °C erreichte. Danach dauerte es noch eine halbe Stunde, bis die Ausgangssubstanz fast zur Gänze destilliert war. Der Ablauf dauerte insgesamt 3 Stunden und 34 Minuten.

Zum Schluss wurde die Heizbadtemperatur mittels Drehknopf auf 0 °C gestellt und der Verdampferkolben aus dem Wasserbad gehoben. Die Rotation wurde mittels Drehknopf abgestellt und das Labor-Vakuum-System mittels „AIR“ belüftet. In dieser Einstellung konnte das System noch 2 – 3 Minuten nachlaufen und anschließend die Kühlflüssigkeit und alle Kippschalter abgedreht werden. Im Auffangkolben befanden sich 185 ml destilliertes Wasser und im Verdampferkolben 15 ml braune Flüssigkeit. Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 12,87 g.

**Tabelle 20: Versuch Nr. 2**

<b>Versuch Nr. 2</b>	
<b>Datum</b>	27.02.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	200
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	78
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	200
<b>Start</b>	08:15
<b>Ende</b>	11:30
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	4
<b>Menge (g)</b>	11,75

Bei Versuch Nr. 2 wurde die Rotationsgeschwindigkeit gleich zu Anfang auf 60 Umdrehungen/min und die Heizbadtemperatur auf 60 °C eingestellt.

Die 60 °C wurden nach 10 Minuten im Heizbad erreicht. Hierbei wurde dann die Temperatur mittels Drehregler auf 65 °C erhöht. Bei dieser Temperatur beginnt der Urin zu schäumen (siehe Abb. 23).



**Abbildung 23: Schäumender Urin**

Nach einer Viertelstunde wurden die 65 °C erreicht und auf 70 °C erhöht. Bei 69 °C begann der Urin zu kochen. Anschließend wurde die Temperatur im 10-Minuten-Takt um jeweils 2 °C erhöht, bis 78 °C erreicht waren.



**Abbildung 24: Primärdünger im Verdampferkolben**



**Abbildung 25: Destilliertes Wasser im Auffangkolben**

Um 11:25 wurde die Heizbadtemperatur mittels Drehknopf auf 0 °C gestellt und der Verdampferkolben aus dem Wasserbad gehoben. Das Labor-Vakuum-System wurde mittels „AIR“ belüftet und die Rotation des Verdampferkolbens abgestellt. Im Auffangkolben befanden sich diesmal 196 ml destilliertes Wasser (siehe Abb. 25) und im Verdampferkolben 4 ml braune Flüssigkeit. Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 11,75 g.

**Tabelle 21: Versuch Nr. 3**

<b>Versuch Nr. 3</b>	
<b>Datum</b>	08.03.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	200
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	84
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	200
<b>Start</b>	08:07
<b>Ende</b>	09:45
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	12,5
<b>Menge (g)</b>	19,06

Bei Versuch Nr. 3 wurde die Rotationsgeschwindigkeit wieder auf 60 Umdrehungen/min und die Heizbadtemperatur auf 60 °C eingestellt.

Die Temperatur wurde nach 12 Minuten auf 65 °C erhöht, wobei der Urin bei Erreichen der eingestellten Temperatur wieder zu kochen begann. An dieser Stelle wurde die Temperatur auf 70 °C eingestellt und anschließend alle 4 Minuten um 2 °C erhöht, bis eine Temperatur von 84 °C erreicht war.

Um 09:45 wurde die Anlage ausgeschaltet. Im Auffangkolben befanden sich 187,5 ml destilliertes Wasser und im Verdampferkolben 12,5 ml braune Flüssigkeit. Beim Wiegen ergaben sich ein Gewicht von 19,06 g.

**Tabelle 22: Versuch Nr. 4**

<b>Versuch Nr. 4</b>	
<b>Datum</b>	09.03.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	400
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	85
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	200
<b>Start</b>	1. Versuch 8:05, 2. Versuch 8:25
<b>Ende</b>	10:25
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	60
<b>Menge (g)</b>	54,36

Bei Versuch Nr. 4 wurden diesmal 400 ml gelagerter Pferdeurin verwendet.

Die Rotationsgeschwindigkeit wurde auf 60 Umdrehungen/min und die Heizbadtemperatur auf 60 °C eingestellt. Nach einigen Minuten Anlaufzeit wurde auf 110 mbar hinuntergeregelt, hierbei wurde der gesamte Urin durch den Unterdruck vom Verdampferkolben in den Auffangkolben transportiert. An dieser Stelle musste der gesamte Vorgang von neuem begonnen werden.

Nach Hinunterfahren der Anlage wurde der Urin wieder vom Auffangkolben in den Verdampferkolben gefüllt.

Anschließend wurde die Anlage erneut gestartet (8:25), diesmal wieder mit einem Druck von 200 mbar. Nach 5 Minuten konnte eine Heizbadtemperatur von 65 °C erreicht werden.

Danach wurde die Temperatur im 5 – 10-Minuten-Takt um 5 °C erhöht, bis eine Temperatur von 85 °C (um 9:10) erreicht war.

Nach genau 2 Stunden (10:25) wurde die Heizbadtemperatur mittels Drehknopf auf 0 °C gestellt und der Verdampferkolben aus dem Wasserbad gehoben. Im Auffangkolben befanden sich 340 ml destilliertes Wasser und im Verdampferkolben ungefähr 60 ml braune Flüssigkeit. Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 54,36 g.

**Tabelle 23: Versuch Nr. 5**

<b>Versuch Nr. 5</b>	
<b>Datum</b>	18.04.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	500
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	75
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	160
<b>Start</b>	8:25
<b>Ende</b>	10:30
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	130
<b>Menge (g)</b>	138,38

Bei Versuch Nr. 5 wurden 500 ml gelagerter Pferdeurin verwendet.

Diesmal wurden zwei Energiemessgeräte der Firma Voltcraft, jeweils eines für das Labor-Vakuum-System und eines für den Rotationsverdampfer, verwendet (siehe Abb. 26). Hiermit sollte der tatsächliche Energieverbrauch der Destillationsanlage im Labormaßstab festgestellt werden.



**Abbildung 26: Energiemessgeräte Voltcraft**

Die Rotationsgeschwindigkeit wurde wieder auf 60 Umdrehungen/min, die Heizbadtemperatur anfänglich auf 60 °C eingestellt und der Verdampferkolben ins Heizbad eingetaucht. Nach automatischer Druckeinstellung wurde diesmal auf einen Druck von 160 mbar manuell nachgeregelt.



**Abbildung 27: Rotationsverdampfer**

Schon nach 10 Minuten konnten die 60 °C im Heizbad erreicht und auf 65 °C erhöht werden. Nach weiteren 5 Minuten wurde die Temperatur auf 70 °C erhöht, diese waren nach 5 Minuten erreicht. Anschließend wurde die Heizbad-Temperatur auf 75 °C gestellt.

Nach 2 Stunden und 5 Minuten (10:30) wurde die Heizbadtemperatur mittels Drehknopf auf 0 °C gestellt. Im Auffangkolben befanden sich ungefähr 360 ml destilliertes Wasser und im Verdampferkolben 130 ml braune Flüssigkeit. Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 150,38 g.

Der Energieverbrauch der Membranpumpe betrug für zwei Stunden 0,09 kWh. Mit einem Wert von 0,83 kWh lag der Energieverbrauch des Rotationsverdampfers deutlich über dem der Membranpumpe.

**Tabelle 24: Versuch Nr. 6**

<b>Versuch Nr. 6</b>	
<b>Datum</b>	19.04.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	500
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	70
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	120
<b>Start</b>	7:47
<b>Ende</b>	09:37
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	80
<b>Menge (g)</b>	93,84

Bei Versuch Nr. 6 wurden nochmals 500 ml gelagerter Pferdeurin verwendet.

Die Rotationsgeschwindigkeit wurde auf 60 Umdrehungen/min und die Heizbadtemperatur auf 50 °C eingestellt. Diesmal wurde auf einen Druck von 120 mbar hinuntergeregelt.

Die Heizbadtemperatur von 50 °C wurde nach 10 Minuten erreicht und auf 58 °C erhöht. Anschließend wurde die Temperatur auf 65 °C und nach weiteren 10 Minuten auf 70 °C erhöht.

Nach knappen 2 Stunden (09:37) waren im Verdampferkolben 80 ml und im Auffangkolben 420 ml verblieben.

Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 93,84 g.

Die „Voltcraft“ Energiemessgeräte ergaben für die Membranpumpe einen Energieverbrauch von 0,09 kWh und für den Rotationsverdampfer 0,73 kWh.

**Tabelle 25: Versuch Nr. 7**

<b>Versuch Nr. 7</b>	
<b>Datum</b>	19.04.2017
<b>Ausgangssubstanz</b>	Gelagerter Pferdeurin (ohne Säurezugabe)
<b>Menge (ml)</b>	450
<b>pH-Wert</b>	8
<b>Heizbadtemperatur (°C)</b>	65-66
<b>Rotation (Umdrehungen/min)</b>	60
<b>Druck (mbar)</b>	100, danach 150
<b>Start</b>	9:42
<b>Ende</b>	11:40
<b>Endsubstanz</b>	Flüssigdünger
<b>Menge (ml)</b>	100
<b>Menge (g)</b>	118,90

Bei Versuch Nr. 7 wurden 450 ml gelagerter Pferdeurin verwendet.

Die Rotationsgeschwindigkeit wurde auf 60 Umdrehungen/min gestellt, während das Wasser im Heizbad noch vom vorherigen Versuch auf 65 °C erwärmt war.

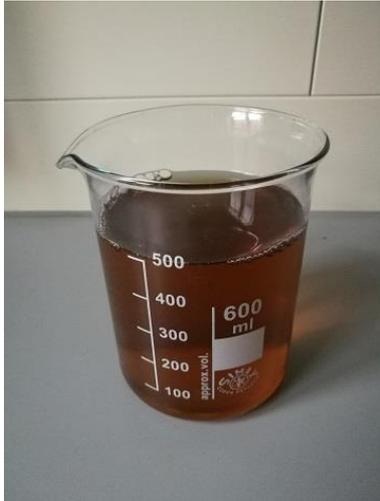
Nach automatischer Druckeinstellung wurde manuell auf einen Druck von 100 mbar hinuntergeregelt.

Da die Heizbadtemperatur von 65 °C schon erreicht und der Druck niedriger als in den vorherigen Versuchen war, kochte der Urin schon nach 5 Minuten. Hiermit konnte eine Temperatur von 65 °C beibehalten werden.

Nach einer halben Stunde wurde der Druck auf 115 mbar hinaufgeregelt, da ein Druck von 100 mbar von der Membranpumpe kaum gehalten werden konnte.

Nach 2 Stunden wurden die Heizbadtemperatur und die Membranpumpe abgestellt. Im Verdampferkolben befanden sich 100 ml und im Auffangkolben 350 ml. Beim Wiegen ergab sich ein Gewicht von 118,90 g.

Nach Abschluss der Versuche kann man einen farblichen Unterschied zwischen dem gelagerten Pferdeurin und dem destillierten Urin erkennen (siehe *Abb. 28* und *29*). Nach der Destillation erhält man eine braune (hochkonzentrierte) Flüssigkeit, die als Primärdünger dienen kann.



**Abbildung 28: Gelagerter Pferdeurin**



**Abbildung 29: Destillierter Pferdeurin**

In *Abb. 30* werden die Versuche 1 – 3 miteinander verglichen. Die Versuche wurden mit der gleichen Anfangsmenge an Pferdeurin und dem gleichen Druck durchgeführt. Dafür wurde die Heizbadtemperatur mit jedem weiteren Versuch erhöht, was wiederum zu einer Verringerung der Verdampfungszeit führte.

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
<b>Anfangsmenge (ml)</b>	200	200	200
<b>Endmenge (ml)</b>	15	4	12,5
<b>Heizbadtemperatur °C)</b>	68	78	84
<b>Druck (mbar)</b>	200	200	200
<b>Zeit (h:min)</b>	03:37	03:15	01:38

**Abbildung 30: Vergleich der Versuche 1 – 3**

Die Versuche 4, 5, 6 und 7 (siehe *Abb. 31*) unterscheiden sich durch verschiedene Parameter, wie Anfangsmenge, Heizbadtemperatur, Druck und Zeit. Bei jedem der vier Versuche wurden andere Einstellungen vorgenommen, um die Einflüsse der verschiedenen Parameter zu testen. Hierbei wurde deutlich, dass es am effektivsten ist, wenn der Druck verringert und somit eine niedrigere Heizbadtemperatur benötigt wird. Hiermit konnte der Energieverbrauch, sowie die Verdampfungszeit verringert werden.

	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7
Anfangsmenge (ml)	400	500	500	450
Endmenge (ml)	60	130	80	100
Heizbadtemperatur (°C)	85	75	70	65-66
Druck (mbar)	200	160	120	100 und 150
Zeit (h:min)	02:00	02:05	01:50	01:58

**Abbildung 31: Vergleich der Versuche 4 – 7**

Schlussfolgernd konnte festgestellt werden, dass bei einem Druck von 120 mbar und einer Heizbadtemperatur von 70 ml das beste Ergebnis erzielt wurde.

Für weitere Versuche in diesem Forschungsgebiet wäre anzuraten den Druck möglichst niedrig zu halten. Somit wird eine niedrigere Heizbadtemperatur benötigt und der Energieverbrauch sowie die Verdampfungszeit werden gesenkt.

#### **4.1.3 Energieverbrauch**

Der Energieverbrauch hängt im Wesentlichen von den folgenden Komponenten ab:

- elektrische Energie für die Vakuumpumpe
- Motor der Rotationsanlage
- Wärmeverlust an die Umgebung
- elektrische Beheizung der Flüssigkeit im Heizbad
- Kühlwasser für den Kondensator / Kühler
- Kühlung der Vakuumpumpe

Die Energie, die benötigt wird, um das Wasser bis zum Siedepunkt zu erhitzen, und die Energie, um das Wasser am Siedepunkt zu verdampfen, stellen zusammen den minimalen Energiebedarf für die Verdunstungswasserentfernung dar (Udert und Wächter, 2012, 7).

Der ungefähre Energieverbrauch wurde über die Verdampfungsenthalpie von Wasser berechnet, da Wasser dem Urin in seinen Eigenschaften am nächsten kommt.

Nachfolgende Rechnung wurde für einen Destillationsvorgang von 1000 ml Urin auf 400 ml Konzentrat aufgestellt. Hierfür wurde die Verdampfungsenthalpie von Wasser (2257 kJ/kg) mit der verdampften Wassermenge (Massenprozent des destillierten Wassers) multipliziert und anschließend in kWh umgerechnet.

**Tabelle 26: Eigenschaften von Wasser (Moyes und Schulte, 2006, 34)**

Lösungsmittel	Verdampfungsenthalpie (kJ/kg)	Schmelzpunkt (°C)	Siedepunkt (°C)
Wasser	2257	0	100

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,6 = 1354,2 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,38 kWh

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden bei der Destillation bei einem Druck von 100 – 115 mbar und einer Temperatur von 65 °C die besten Ergebnisse erzielt.

In den Tests des Wasserforschungsinstitutes Eawag wurde laut Maurer (2007, 16) nicht-hydrolysiertes Urin bei 200 mbar und 78 °C destilliert. Unter diesen Bedingungen war es leicht möglich, das Volumen um den Faktor 10 zu reduzieren.

Nach Udert (2017) verbrauchen bestehende Urinbehandlungsanlagen (industrielle Destillationsanlagen) um die 107 Wh/L. Werte von bis zu 80 Wh/L können theoretisch und praktisch ebenfalls erreicht werden.

Andere mögliche Verfahren sind nach Maurer (2007, 16) die Teilgefrierung und E-Stripping. Bei der Teilgefrierung wird der Urin so weit gefroren, dass ein Teil des Urins flüssig bleibt. In der flüssigen Phase befindet sich der Großteil der Nährstoffe, während das Eis hauptsächlich Wasser enthält. Beim E-Stripping wird Ammoniak z. B. mit Luft aus dem Urin ausgetrieben und in eine Ammoniak- oder Ammoniumsulfatlösung übergeführt. Beide Produkte können als chemischer Rohstoff oder als Dünger verwendet werden.

Die Herstellung eines flüssigen Konzentrats anstelle eines Festkörpers hat einige wesentliche Vorteile. Der Betrieb ist einfacher und der Prozess ist sicherer, da keine Skalierung auftritt. Flüssige Düngemittel könnten auch einen höheren Marktwert als Trockensubstanzen erreichen.

In einem Pferdeinstellbetrieb mit 50 Boxen fallen 250 – 500 Liter Urin pro Tag an. Umgerechnet aufs Jahr sind dies 91 250 – 182 500 Liter.

Durch den Destillationsvorgang können aus 1000 ml Urin ungefähr 400 ml Konzentrat produziert werden. Auf den jährlich anfallenden Urin in einem 50-Boxen-Pferdeinstellbetrieb sind dies umgelegt 36 500 – 73 000 Liter Konzentrat. Ein Destillationsvorgang von 1000 ml Urin auf 400 ml Konzentrat bedingt einen Energieverbrauch von 0,38 kWh (Abhängig von der verwendeten Apparatur). Die Kosten für

1 kWh liegen derzeit zwischen 14 und 23 Cent (E-Control, 2017). In diesem Fall würden die Kosten bei 3,5 – 5,7 Cent liegen. Hieraus können die ungefähren Energiekosten pro Jahr errechnet werden. Bei 3,5 Cent ergeben sich für 1 Liter Urin ungefähre Kosten von 306 €/Jahr und bei 5,7 Cent 499 €/Jahr.

In anderen Tests des Wasserforschungsinstitutes Eawag, im Forum Chriesbach, konnten aus 1000 Litern Urin ungefähr 30 Liter eines hochkonzentrierten Flüssigdüngers gewonnen werden (Etter und Udert, 2015, 5).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden ebenfalls Versuche durchgeführt, jedoch im Labormaßstab, weshalb sie nicht hundertprozentig vergleichbar sind mit jenen der Eawag. Die Destillationszeit, der Energieverbrauch sowie die verwendeten Mengen unterscheiden sich maßgeblich von den Ergebnissen industrieller Anlagen.

Im Folgenden eine Vergleichstabelle, um dies zu illustrieren:

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6	Versuch 7
<b>Anfangsmenge (ml)</b>	200	200	200	400	500	500	450
<b>Endmenge (ml)</b>	15	4	12,5	60	130	80	100
<b>Massenprozent (m%)</b>	8	2	6	15	26	16	22

**Tabelle 27: Vergleichstabelle der Versuche 1 – 7**

Bei **Versuch 1** lässt sich erkennen, dass die Endmasse nur 8 % der Ausgangsmenge ausmacht. Durch Einsetzen der Verdampfungsenthalpie von Wasser (2257 kJ/kg) und der verdampften Wassermenge (Massenprozent des destillierten Wassers) in die Formel, lässt sich der Energieverbrauch für diesen Versuch ermitteln.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,08 = 2076,4 \text{ kJ} * 0,000278 \text{ (Umrechnungsfaktor)} = \underline{0,58 \text{ kWh}}$

Daraus ergibt sich ein deutlich höherer Energieverbrauch als in den Test der Eawag. Zudem wurden statt 1000 ml nur 200 ml Urin verdampft. Dies hängt auch mit der höheren Effizienz der industriellen Anlagen im Vergleich zu Anlagen im Labormaßstab ab.

Bei **Versuch 2** wurde mehr Flüssigkeit verdampft als in Versuch 1, um den Primärdünger noch stärker zu konzentrieren.

Hier blieben nur 2 % der Ausgangsmenge übrig. Die Zeit konnte aber dennoch verkürzt werden. Dies ist auf eine höhere Heizbadtemperatur zurückzuführen. Allerdings wird der Energieverbrauch durch die Steigerung der Temperatur ebenfalls erhöht.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,98 = 2211,9 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,61 kWh

Bei **Versuch 3** wurde wieder ähnlich viel verdampft wie in Versuch 1. Diesmal aber in unter der Hälfte der Zeit. Dies ist wieder auf die höhere Temperatur des Heizbades zurückzuführen.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,94 = 2121,6 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,59 kWh

Der Energieverbrauch ist immer noch relativ hoch, was auch auf die höhere Heizbadtemperatur zurückzuführen ist.

Bei **Versuch 4** wurden 400 ml statt 200 ml verwendet. Hierbei wurde auch weniger verdampft als in den vorherigen Versuchen.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,85 = 1918,5 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,53 kWh

Der Energieverbrauch konnte nur geringfügig gesenkt werden, was ebenfalls durch die höheren Heizbadtemperaturen bedingt ist.

Bei **Versuch 5** wurden 500 ml verwendet. Hierbei wurde ebenfalls wieder weniger verdampft als in den vorherigen Versuchen.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,74 = 1670,18 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,46 kWh

Der Energieverbrauch konnte bei Versuch Nr. 5 gesenkt werden, da der Druck der Membranpumpe von 200 mbar auf 160 mbar hinuntergeregelt wurde und die Heizbadtemperatur um 9 °C geringer war als in den vorherigen Versuchen. Die Membranpumpe verbraucht im Allgemeinen weniger Energie als das Heizbad, da das Erwärmen und Halten der Heizbad-Temperatur sehr viel Energie benötigt.

Mithilfe der Energiemessgeräte konnte ein Wert von 0,92 kWh gemessen werden. Dieser fast doppelt so hohe Wert ergibt sich aus Verlusten der Labordestillationsanlage.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,84 = 1895,88 \text{ kJ} * 0,000278$  (Umrechnungsfaktor) = 0,53 kWh

Der Energieverbrauch bei **Versuch 6** ist wieder leicht gestiegen, da hier wieder mehr verdampft wurde als in Versuch Nr. 5. Der Druck der Membranpumpe wurde auf 120 mbar und die Heizbadtemperatur um 5 °C hinuntergeregelt, im Vergleich zu den vorherigen Versuchen.

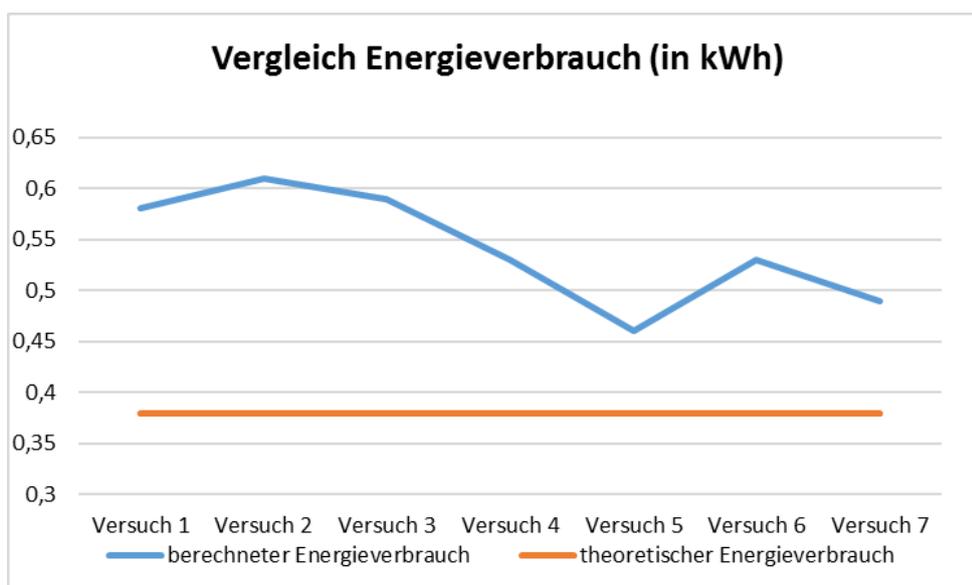
Mithilfe der Energiemessgeräte konnte ein Wert von 0,82 kWh gemessen werden. Im Vergleich zu Versuch Nr. 5 wurde mit den Energiemessgeräten ein geringerer Energieverbrauch gemessen.

Energieverbrauch = Verdampfungsenthalpie Wasser \* Massenprozent des destillierten Wassers =  $2257 * 0,78 = 1760,46 \text{ kJ} * 0,000278 \text{ (Umrechnungsfaktor)} = \underline{0,49 \text{ kWh}}$

Der Energieverbrauch bei **Versuch 7** ist wieder gesunken, da hier das Wasser im Heizbad vom vorherigen Versuch vorgewärmt war. Der Druck der Membranpumpe wurde zu Beginn auf 100 – 115 mbar und die Heizbadtemperatur nochmals um 5 °C hinuntergeregelt im Vergleich zu Versuch Nr. 6.

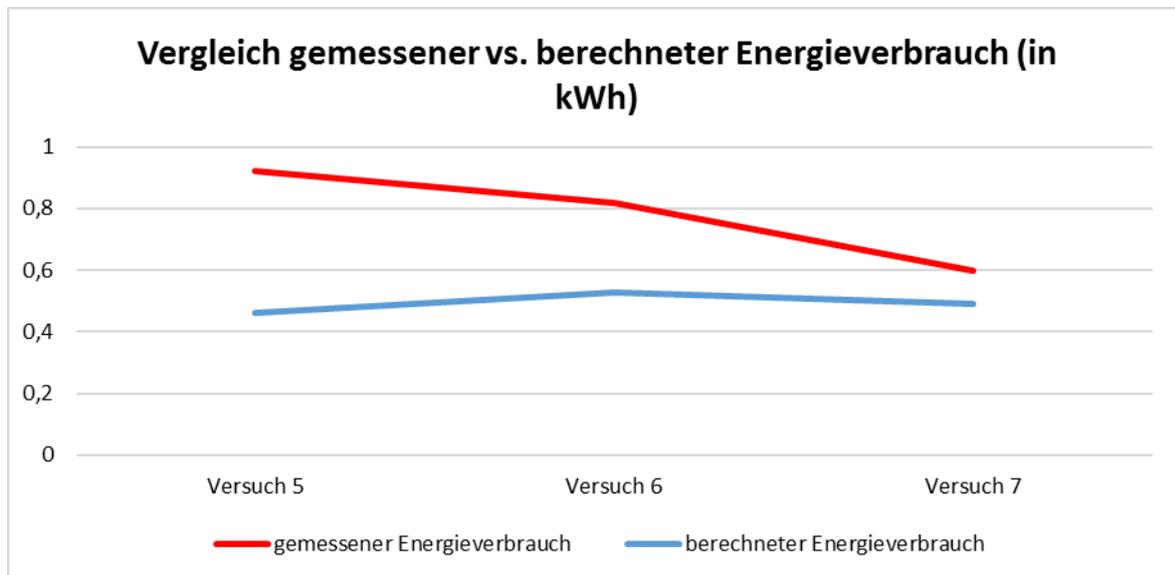
Mithilfe der Energiemessgeräte konnte ein Wert von 0,60 kWh gemessen werden. Daraus würde sich bei 160 h / Monat ein ungefährender monatlicher Energieverbrauch von 96 kWh ergeben. Hieraus lässt sich schließen, dass das Erwärmen der Flüssigkeit im Heizbad sehr viel Energie benötigt. Läuft die Destillationsanlage länger bzw. durch, so lässt sich der Energieverbrauch deutlich senken.

Zudem könnte es noch effektiver, wenn eine geringere Menge verdampft wird. Wie weiter oben erwähnt kann aus 1000 ml Urin ungefähr 400 ml Konzentrat produziert werden.



**Abbildung 32: Vergleich Energieverbrauch (in kWh)**

In Abb. 32 ist zu erkennen, dass der errechnete Energieverbrauch der Versuche deutlich höher ist als der theoretische Energieverbrauch der benötigt wird um 1000 ml Urin auf 400 ml Konzentrat zu verdampfen. Außerdem konnte der berechnete Energieverbrauch im Laufe der Versuche nach einem kurzen Anstieg, gesenkt werden. Dies ist auf die erhöhten Verdampfungsmengen zurück zu führen.



**Abbildung 33: Vergleich gemessener vs. berechneter Energieverbrauch (in kWh)**

In Abb. 33 werden nur die Versuche 5-7 miteinander verglichen, da hier zusätzlich mit Energiemessgeräten mitgemessen wurde. Hierbei ist zu erkennen, dass der gemessene Energieverbrauch der Versuche über dem berechneten Energieverbrauch liegt. Auffällig ist, dass der berechnete Energieverbrauch steigt, während der tatsächlich gemessene Energieverbrauch sinkt. Dies liegt daran, dass die verdampfte Menge gestiegen ist und somit auch das Ergebnis der Rechnung. Der tatsächlich gemessene Energieverbrauch ist aber aufgrund der Druckänderung gesunken. Sobald der Druck der Membranpumpe gesenkt wird, sinkt die Siedetemperatur und eine niedrigere Heizbadtemperatur wird benötigt. Da die Membranpumpe weniger Energie benötigt als die Erhöhung der Heizbadtemperatur, sinkt auch der Energieverbrauch.

Der Einzelhandelspreis des Düngers könnte (je nach Marke und Produkttyp) nach Etter et al. (2015, 35) zwischen 8 und 650 € liegen. Der Umsatz ist eher gering, wenn der Dünger auf Basis der Düngerpreise verkauft wird. Um einen maximalen Umsatz zu erzielen, sollte der Dünger als Nischenprodukt wie zum Beispiel als Blütendünger vermarktet werden. Das im Auffangkolben zurückbleibende destillierte Wasser könnte zum Beispiel zur Bewässerung der Halle weiterverwendet oder ebenfalls verkauft werden.

In *Tab. 28* sind die Ergebnisse der destillierten Proben dargestellt. Hierbei stellen U5, U6 und U7 die destillierten Proben und U5-U7 die zugehörige Urinprobe dar.

Die Proben wurden in 3 Replikate mit 5 mL 65% HNO<sub>3</sub> + 1 mL 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in der Mikrowelle aufgeschlossen um die Gesamtgehalte zu erfassen und anschließend an der ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry) gemessen. Phosphor wurde am Photometer gemessen, weil die LOD (Erfassungsgrenze) an der ICP (Inductively Coupled Plasma) zu hoch war.

Bei den Werten Aluminium, Eisen, Mangan und Zink lagen die Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze (<LOQ). Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Pferde einen Mangel an Spurenelementen haben (vor allem Zink und Selen), da diese häufig nicht durch das Grundfutter gedeckt, sondern zugefüttert werden müssen. Die Werte Calcium, Kalium, Magnesium, Natrium und Phosphor sind im Gegensatz zur reinen Urinprobe, nach der Destillation gestiegen.

Die Menge an Calcium ist bei den destillierten Proben U6 und U7 sogar verdoppelt worden und auch bei Probe U5 hat sich die Menge erhöht. Bei Kalium ist der Effekt noch stärker erkennbar. Hierbei konnte der Wert in der destillierten Probe U6 sogar verachtfacht werden. Fast genauso stark ist dieser Effekt bei Magnesium. Der Wert konnte nach der Destillation um ein Vielfaches gesteigert werden. Auch der Natriumwert konnte gesteigert werden. Der Phosphorwert hat sich ebenso verdoppelt (U5) bis vervierfacht (U6).

Hierbei lässt sich erkennen, dass die Destillation gut geeignet ist um den Pferdurin aufzubereiten und anschließend einer Nutzung als Dünger zuzuführen.

Tabelle 28: Resultate der destillierten Proben (in mg/L)

Results in mg/L	Messung	LOQ	U5		U6		U7		U5-7	
			Mittelwert	SD (% des Mittelwerts)						
Al (Aluminium)	ICP OES	1,8	<LOQ		<LOQ		<LOQ		<LOQ	
Ca (Calcium)	ICP OES	13,6	45,2	8,2	95,2	11,9	84,9	19,1	37,7	5,1
Fe (Eisen)	ICP OES	9,2	<LOQ		<LOQ		<LOQ		<LOQ	
K (Kalium)	ICP OES	2,8	1129,2	1,3	2679,8	11,4	2090,6	20,0	329,8	2,9
Mg (Magnesium)	ICP OES	7,9	92,3	1,7	207,2	11,3	167,1	19,0	27,7	2,6
Mn (Mangan)	ICP OES	1,1	<LOQ		<LOQ		<LOQ		<LOQ	
Na (Natrium)	ICP OES	3,4	19,7	3,7	44,5	11,7	34,7	19,7	5,4	4,1
P (Phosphor)	Photometer	1,0	5,2	21,2	10,4	2,8	7,3	3,8	2,6	4,0
Zn (Zink)	ICP OES	3,2	<LOQ		<LOQ		<LOQ		<LOQ	

Außerdem könnte die Stallbodenkonstruktion in Zuchtbetrieben Verwendung finden. Der Urin der trächtigen Stuten könnte separat gesammelt und aufbereitet werden. Hierbei spielt das Östrogen, das im Urin trächtiger Stuten enthalten ist, eine entscheidende Rolle. Es kann für Östrogenpräparate verwendet werden und stellt eine lukrative Nebeneinnahmequelle für Zuchtbetriebe dar. Pro Zuchtstute könnten hierbei 3 700 – 9 400 € pro Jahr erzielt werden (in Abhängigkeit von der abgesetzten Urinmenge pro Tag und dem Preis pro Liter) (PeTA, 2007). Zudem werden die Präparate in Deutschland hergestellt, und somit könnte man CO<sub>2</sub> und Transportkosten einsparen, wenn Zuchtbetriebe aus Europa den begehrten Urin liefern würden.

Auch die Herstellung von Wasserstoff aus Urin/Harnstoff ist mittels Elektrolyse möglich. Hierbei spielen der Energieverbrauch der Elektrolyse und die Lagerung des Wasserstoffs eine entscheidende Rolle.

Außerdem ist abzuwägen ob die Herstellung von Wasserstoff eine vernünftige Alternative ist, da Ammoniak in großen Produktionsanlagen (z.B.: Borealis Linz) aus Stickstoff und Wasserstoff hergestellt wird.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach Etter und Udert (2015, 2) verbraucht das Haber-Bosch-Verfahren allein mehr als 1 % der gesamten weltweit produzierten Energie zur Gewinnung von Stickstoff aus der Luft. Phosphor wird aus Phosphatgestein hergestellt, und die bekannten Vorräte dieses Gesteins sind in wenigen Ländern konzentriert. In Zukunft wird dies zu steigenden Düngemittelpreisen führen. Somit besteht ein großes Interesse, alternative Nährstoffquellen zu finden.

Mithilfe der neuen Stallbodenkonstruktion kann der Pferdeurin getrennt von der Boxeneinstreu gesammelt und anschließend aufbereitet- bzw. verwertet werden.

Nach Larsen und Lienert (2007, 13) gibt es mehrere Verfahrenskombinationen zur Urinaufbereitung. Teilweise genügt eine einstufige biologische Behandlung, um das Ausgasen von Ammoniak beim Ausbringen von Dünger zu verhindern. Bei größeren Projekten steigen die Anforderungen, und mehrere Prozesse müssen kombiniert werden.

Im Zuge des VUNA-Projekts wurden nach Etter und Udert (2015, 22) zwei verschiedene Technologien zur Extraktion von Nährstoffen aus dem Urin getestet: einerseits die Struvit-Präzipitation und andererseits die Aufbereitung des Urins mittels Nitrifikation und anschließender Destillation. Bei der Urinaufbereitung hat sich die Kombination dieser beiden Verfahren bewährt. Mithilfe der Nitrifikation werden Bakterien abgetötet und der Geruch beseitigt. Während der Destillation wird der Urin pasteurisiert und die restlichen Viren abgetötet (Etter und Udert, 2015, 6).

Die Destillation wurde laut Etter et al. (2015, 10) aus mehreren Gründen zur Konzentration von Urin ausgewählt. Mithilfe dieser Technologie können praktisch alle in nitriertem Urin enthaltenen Nährstoffe gewonnen werden. Das Destillat enthält nur geringe Mengen an Ammoniak und organischen Verbindungen. Außerdem kann annähernd das gesamte Wasser entfernt werden, und der Energieverbrauch ist unter Verwendung von Energierückgewinnung in Brennereien vergleichsweise niedrig. Zudem sind Destillationsanlagen leicht zugänglich und durch das Hochtemperaturverfahren wird die Lösung pasteurisiert.

Mithilfe industrieller Destillationsanlagen sollte es möglich sein, den errechneten Energieverbrauch um ein Vielfaches zu senken.

Ein Problem stellen noch Arzneimittelrückstände dar, die je nach Verwendungszweck des Endproduktes entfernt werden sollten. Im Labor des Wasserforschungsinstitutes Eawag konnten diese aber laut Etter et al. (2015, 6) bereits mithilfe von Aktivkohlefiltern entfernt werden.

Auch in der Pharmazie könnte der Pferdeurin eine große Rolle spielen. Der Urin trächtiger Stuten wird für das Medikament Presomen® eingesetzt. Dieser wird aus Kanada bezogen, aber in Deutschland verarbeitet. Hierbei gibt es noch großen Forschungsbedarf, aber grundsätzlich wäre es für die Herstellerfirma von Vorteil, wenn der bezogene Urin aus Europa käme. Durch Zusammenarbeit von Zuchtbetrieben in und rund um Deutschland könnte genügend Urin von trächtigen Stuten gesammelt werden, um den importierten Urin zu ersetzen. Außerdem könnten hierbei Kosten und CO<sub>2</sub> eingespart und die nicht tiergerechten Farmen in Kanada zum Schließen oder Umdenken gezwungen werden.

Eine Herausforderung stellt hierbei die Pharmaindustrie dar. Zu dieser müsste Kontakt hergestellt und eventuelle Verhandlungsgespräche vereinbart werden. Zudem sollte die Herstellerfirma der Stallbodenkonstruktion Kontakt zu einigen Umwelt- sowie Tierschutzorganisationen herstellen, um die neuentwickelte Stallbodenkonstruktion zu propagieren.

Eine weitere Nutzung von Urin wäre der Einsatz als Nutzbrennstoff. Dies stellt ein großes Potential auf der Suche nach alternativen Energiequellen dar. Hierbei könnte der Urin/Harnstoff mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt werden. Der gewonnene Wasserstoff kann als klimafreundlicher Kraftstoff für Brennstoffzellen-Autos und als gasförmiger Speicher dienen.

Wasserstoff wird zumeist immer noch aus Erdöl oder mittels Elektrolyse gewonnen. Deshalb ist es wichtig eine Alternative zum Erdöl für die Wasserstoffherstellung zu finden. Wasserstoff ist einer der saubersten Kraftstoffe, denn während der Oxidation von Wasserstoff oder der Verbrennung wird lediglich Wasser erzeugt.

Für die Gewinnung von Wasserstoff aus Urin als Energiequelle für Autos oder Haushalte werden laut Botte (2014) zentralisierte Anlagen nötig sein. Ein erster Prototyp wurde in der Universität von Ohio entwickelt, die sogenannte „GreenBox“. Hierbei enthält ein Tank den Urin, und dieser läuft anschließend durch die Anlage. Dabei wird der Urin in Wasserstoff umgewandelt. Dieser steigt in Blasen auf, wird anschließend gesammelt und daraus Strom erzeugt.

Um ein Auto vollzutanken, benötigt man nach Botte (2014) 5 kg Wasserstoff. Hiermit kommt das Auto 480 km weit. Dafür würde der tägliche Urin von 1250 Menschen benötigt werden. Bei der Verwendung von Pferdeurin würde man den Urin von 250 Pferden benötigen, da die täglich abgesetzte Urinmenge eines Menschen nur ungefähr einem Fünftel der abgesetzten Urinmenge eines Pferdes entspricht. Außerdem ist es durch die neuentwickelte Stallbodenkonstruktion leichter, den Pferdeurin zu sammeln als den Urin von Menschen.

Hierbei besteht allerdings noch weiterer Forschungsbedarf, da die Elektrolyse ebenfalls sehr energieintensiv, und der Output bei einer Verwendung von Pferdeurin ebenfalls unbekannt ist. Dabei muss auch die Speicherung und Lagerung des gewonnenen Wasserstoffes berücksichtigt werden. Außerdem sollte Kontakt zu möglichen Abnehmern hergestellt werden, um Differenzen entgegenzuwirken.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Versuche mit einer Destillationsanlage im Labormaßstab durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass die besten Ergebnisse mit einem niedrigen Druck und einer niedrigen Heizbadtemperatur erzielt werden. Somit kann der Energieverbrauch und die Verdampfungszeit gesenkt werden. Zudem sind die Werte von Calcium, Kalium, Magnesium, Natrium und Phosphor im Gegensatz zur reinen Urinprobe, nach der Destillation gestiegen. Hierbei lässt sich erkennen, dass die Destillation gut geeignet ist um den Pferdeurin aufzubereiten und anschließend einer Nutzung als Dünger zuzuführen.

## Summary and Outlook

According to Etter and Udert (2015, 2), the Haber-Bosch process depleted more than 1 % of the total world energy production for manufacture nitrogen from the air. Phosphorus is produced from phosphate rock, and the known reserves of this rock are concentrated in a few countries. In future, this will lead to rising fertilizer prices. Therefore, there is a big interest to find alternative nutrient sources.

Using the new stable floor construction, the horse urine can be collected separately from the bedding and then processed or recycled.

According to Larsen and Lienert (2007, 13), there are several process combinations for urine preparation. In some cases, a one-level biological treatment is sufficient to prevent the outgassing of ammonia during fertilizer application. For larger projects, the requirements increase, and several processes must be combined.

During the VUNA project, two different technologies for the extraction of nutrients from the urine were tested according to Etter and Udert (2015, 22): on the one hand the struvite precipitation and on the other the treatment of the urine by nitrification and following distillation. The combination of these two methods has proved successful in urine preparation. By nitrification, bacteria are killed and the smell is eliminated. During the distillation, the urine is pasteurized and the remaining viruses are eliminated (Etter and Udert, 2015, 6).

The distillation was selected according to Etter et al. (2015, 10) for several reasons for the concentration of urine. With this technology, practically all nutrients contained in nitrified urine can be obtained. The distillate contains only a few amounts of ammonia and organic compounds. In addition, almost the whole water can be removed and the energy consumption is comparatively low using energy recovery in distilleries. Moreover, distillation plants are easily accessible and the solution is pasteurized by the high-temperature process.

With the aid of industrial distillation plants it should be possible to reduce the calculated energy consumption frequently.

One problem is still drug residues, which should be removed depending on the intended use of the final product. In the laboratory of the water research institute Eawag, according to Etter et al. (2015, 6) they are already removed by means of activated carbon filters.

Also in pharmacy the horse urine could play a big role. The urine of pregnant mares is used for the drug Presomen®. This is sourced Canada but processed in Germany. There is still a great need for research, but in principle it would be advantageous for the manufacturer if the

urine obtained came from Europe. Collaboration between farms in and around Germany could collect enough urine from pregnant mares to replace the imported urine. It could also save costs and CO<sub>2</sub> and force non-animal-friendly farms in Canada to shut down or rethink.

One challenge here is the pharmaceutical industry. For this, contact should be established and possible negotiations negotiated. In addition, the manufacturer of the stable floor construction should contact some environmental and animal welfare organizations to propagate the newly developed stable floor construction.

Another use of urine would be the use as a fuel. This represents a great potential in the search for alternative energy sources. In this case, the urine / urea could be converted into hydrogen by means of electrolysis. The recovered hydrogen can serve as a climate-friendly fuel for fuel cell cars and as a gaseous storage.

Hydrogen is still mostly produced from petroleum or by electrolysis. Therefore, it is important to find an alternative to oil for hydrogen production. Hydrogen is one of the cleanest fuels because only hydrogen is produced during the oxidation of hydrogen or combustion.

According to Botte (2014), centralized plants will be needed to extract hydrogen from urine as a source of energy for cars or households. A first prototype was developed in the University of Ohio, the so-called "GreenBox". In this case, a tank contains the urine, which then runs through the system. The urine is converted into hydrogen. The latter rises in bubbles, is subsequently collected and current is generated therefrom.

In order to fill a car, Botte (2014) requires 5 kg of hydrogen. Here the car comes 480 km. For this, the daily urine of 1250 humans would be needed. The use of horse urine would require the urine of 250 horses, since the amount of daily urine taken by a human being is only about one-fifth of the amount of urine taken by a horse. In addition, the newly developed stable floor construction makes it easier to collect the horse urine than the urine of humans.

However, further research is needed, since the electrolysis is also very energy-intensive, and the output is also unknown in the use of horse urine. The storage and storage of the hydrogen produced must also be considered. In addition, contact with potential customers should be established to counter differences.

In this thesis experiments were carried out with a laboratory-scale distillation unit. It was found that the best results are achieved with a low pressure and a low bath temperature. Thus, the energy consumption and the evaporation time can be lowered. In addition, the levels of calcium, potassium, magnesium, sodium and phosphorus, as opposed to the pure urine sample, have increased after distillation. Here it can be seen that the distillation is well suited to prepare the horse urine and then use as fertilizer.

## 7 Literaturverzeichnis

- Adamus (2017): Experteninterview zum Medikament Presomen. Mitarbeiter Medizinische Abteilung Abbott Arzneimittel GmbH, Wien (14.01.2017).
- Allin, J. (2013): Premstoppers. Online: <http://horsefund.org/premstoppers-home.php> (30. 03. 2017).
- Autenrieth, S. (2013): pferdundfutter-Ratgeber Pferdefütterung: 125 Fragen und Antworten rund um die Pferdefütterung. Online: [http://www.pferdundfutter.de/images/dbimages/cms/file/pferdundfutter\\_de-Ratgeber%20Pferdef%C3%BCttering\(1\).pdf](http://www.pferdundfutter.de/images/dbimages/cms/file/pferdundfutter_de-Ratgeber%20Pferdef%C3%BCttering(1).pdf) (22. 11. 2016).
- Bartunek, R. J. (2016): Belgian scientists make novel water-from-urine machine. Science News, Reuters. Online: <http://www.reuters.com/article/us-belgium-science-urine-idUSKCN1061OY> (05. 04. 2017).
- Baumgartner, W. (2005): Klinische Propädeutik der inneren Krankheiten und Hautkrankheiten der Haus- und Heimtiere: Untersuchung des Harns: Physiologischer Befund. 6. Auflage, Stuttgart: MVS Medizinverlage Stuttgart GmbH & Co KG.
- Bender, I. (2009): Praxishandbuch Pferdefütterung. 4. Auflage, Stuttgart: Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co KG, 133 – 138.
- Bender, I. (2011): Wasser marsch....!. Das Islandpferde Online Magazin: 1-8. Online: <http://www.toeltknoten.de/pdf/Wasser%20marsch-I-Bender-04.11.pdf> (21. 11. 2016).
- Boggs, B., Botte, G. und King, R. (2009): Urea electrolysis: direct hydrogen production from urine. ChemComm, 4859 – 4861. Online: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2009/cc/b905974a> (07. 03. 2017).
- Botte, G. (2014): [YouTube-Video.]. Interview geführt von Thierry Berrod und Quincy Russell, veröffentlicht am 09. 12. 2014 unter <https://www.youtube.com/watch?v=mywuc90C3gU> (12. 04. 2017).
- Brudenell, K., Ruddock, J. und Short, T. D. (2003): Energy integration in ammonia production. Transactions on Ecology and the Environment vol 62: 268-275. Online: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/EENV03/EENV03025FU.pdf> (12. 01. 2017).
- Brügger, D. (1997): Hormone aus Stutenharn. pharma-kritik; Bd. 19: 23+24. Online: <https://www.infomed.ch/attachments/pk06-97.pdf> (09. 03. 2017).
- Dahler, J, Koch, U., Lucae, C. und Teut, M. (2008): Kursbuch Homöopathie. 1. Auflage, München: Elsevier GmbH, 34 – 39.

- E-Control (2017): Was kostet eine Kilowattstunde Strom. Online: <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh> (18. 04. 2017).
- Escher, B. (2007): Hilft NoMix bei Umweltproblemen durch Pharmaka? Eawag News 63d, 23-25. Online: <http://www.siedlungshygiene2008.ch/fr/documentation/files/Urinseparierung-unter-Lupe-en63d.pdf> (13.04.2017).
- Etter, B. und Udert, K. (2015): Aus Urin wird Flüssigdünger. Online: [http://www.Eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/Newsletter/2015/01/01\\_d.pdf](http://www.Eawag.ch/fileadmin/Domain1/News/Newsletter/2015/01/01_d.pdf) (16. 03. 2016).
- Etter, B., Udert, K. und Gounden, T. (2015): Valorisation of Urine Nutrients: Promoting Sanitation & Nutrient Recovery through Urine Separation. Dübendorf, Eawag. Online: [https://www.Eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA\\_Final\\_Report\\_2015.pdf](https://www.Eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/eng/projekte/vuna/doc/VUNA_Final_Report_2015.pdf) (29. 11. 2016).
- Feyrer, J., Jepsen, J. und Schulz, T. (2008): Wasserstoff und dessen Gefahren: Ein Leitfaden für Feuerwehren, Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren in der Bundesrepublik Deutschland.
- Garbe, C. und Orfanos, C. (2002): Therapie der Hautkrankheiten. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 621 – 626.
- Gethke-Albinus, K. (2012): Verfahren zur Gewinnung von Sekundärphosphaten aus flüssigen Stoffströmen und deren Einfluss auf die deutsche Phosphorbilanz. Diss., Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen.
- Heidolph Instruments GmbH & Co. KG (2008): Betriebsanleitung LABOROTA 4000eco.
- Hell, F. (2005): Elektrodialyse zur Nitratentfernung und Teilenthärtung bei der Trinkwasseraufbereitung am Beispiel Kleylehof. Online: <http://www.wabag.com/wp-content/uploads/2012/04/Elektrodialyse-zur-Nitratentfernung.pdf> (28. 11. 2016).
- Hellström, D., Johansson, E. und Grennberg, K. (1999): Storage of human urine: Acidification as a method to inhibit decomposition of urea. Ecological Engineering 12(3 – 4), 253 – 269.
- Hussey, M. (2014): Stools made of sand and urine by Peter Trimble. Online: <https://www.dezeen.com/2014/02/08/stools-made-of-sand-and-urine-by-peter-trimble/> (17. 12. 2016).
- Ieropoulos, I. A., Ledezma, P., Stinchcombe, A., Papaharalabos, G., Melhuisha, C. und Greenman, J. (2013): Waste to real energy: the first MFC powered mobile phone.

- Physical Chemistry Chemical Physics 15, 15312 – 15316. Online: <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2013/cp/c3cp52889h> (30. 03. 2017).
- Jamieson, H., Khosravi, A., Lind, M., Waller, A. und Yin, H. (2013): Impact of acids on the structure and composition of Linde Type A zeolites for use in reverse osmosis membranes for recovery of urine-containing wastewaters. *Microporous and Mesoporous Materials* 201: 50 – 60.
- Keller, H. (1999): Krankheiten der Harnorgane. In: Wintzer, H. (Hrsg.): *Krankheiten des Pferdes*. 3. Auflage, Berlin: Parey Buchverlag, 243 – 245.
- Lara, M. J. (1997): *Uroopathy: The Most Powerful Holistic Therapy*. The Uroopathy Foundation.
- Larsen, T. und Lienert, J. (2007): Novaquatis Abschlussbericht NoMix - Neue Wege in der Siedlungswasserwirtschaft. Dübendorf, Eawag. Online: [http://www.novaquatis.Eawag.ch/publikationen/abschlussbericht\\_D](http://www.novaquatis.Eawag.ch/publikationen/abschlussbericht_D) (16. 03. 2017).
- Maurer, M. (2007): Aufbereitung von Urin – Flexibilität pur. *Eawag News* 63d, 20-22. Online: <http://www.siedlungshygiene2008.ch/fr/documentation/files/Urinseparierung-unter-Lupe-en63d.pdf> (30. 03. 2017).
- Meissner, D. (2013): Reinstwasser. In: Arndt, T. und Gressner, A. (Hrsg.): *Lexikon der Medizinischen Diagnostik*. 2. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1166.
- Melin, T. und Rautenbach, R. (2004): *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*. 3. Auflage, Berlin: Springer-Verlag.
- Meyer, H. und Coenen, M. (2002): *Pferdefütterung*. 4. Auflage, Berlin: Paul Parey Verlag.
- Moyes, C. D. und Schulte, P. M. (2006): *Tierphysiologie, Lösungsmittel und gelöste Stoffe*. München: Pearson Education Deutschland GmbH, 33 – 36.
- Mylan Healthcare GmbH (2016): Beipackzettel Presomen 28/0.6MG.
- Nebe, H., und Francken-Welz, H. (s. a.): Großes Interesse am Thema Pferdemistentsorgung. Online: [http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/ALL/D51A6626F42DBB8BC1257ACC003589E2/\\$FILE/Grosses\\_Interesse\\_Pferdemistentsorgung.pdf](http://www.dlr.rlp.de/internet/global/themen.nsf/ALL/D51A6626F42DBB8BC1257ACC003589E2/$FILE/Grosses_Interesse_Pferdemistentsorgung.pdf) (23. 12. 2016).
- Nikolaus, K. und Ripperger, S. (2008): Trinkwassergewinnung mittels Umkehrosmose und Transmembrandestillation – ein Vergleich. *Chemie Ingenieur Technik* 80/9, 1277 – 1278. Online: <http://onlinelibrary-wiley-com-1bokusummon.pisces.boku.ac.at/doi/10.1002/cite.200750650/pdf> (29. 11. 2016).

- Ohl, M. (2009): Elektrolyse und Brennstoffzelle: Wasserstoffspeicherung. Forschungsarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart.
- PeTA (2007): Die Tragödie der PMU Farmen. Online: <http://www.peta.de/die-tragoedie-der-pmu-farmen> (15. 12. 2016).
- Pronk, W., Palmquist, H., Biebow, M. und Boller, M. (2006): Nanofiltration for the separation of pharmaceuticals from nutrients in source-separated urine. *Water Research* 40, 1405 – 1412.
- Pronk, W., Biebow, M. und Boller, M. (2006): Electrodialysis for recovering salts from a urine solution containing micropollutants. *Environmental Science & Technology*, 40, 2414 – 2420.
- Pronk, W., Dodd, M., Zuleeg, S., Escher, B. und von Gunten, U. (2008): Ozonation of micropollutants in source-separated urine: Feasibility and process modeling.
- Schaal, S., Kunsch, K. und Kunsch, S. (2016): *Der Mensch in Zahlen: Eine Datensammlung in Tabellen mit über 20000 Einzelwerten*. 4. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 146 – 160.
- Schüßler, A. (2011): Biodiversität. *Labor and more*, 5.12, 18 – 21.
- Schroeder, P. (2015): Pee Power aus England. Online: <http://www.ingenieur.de/Fachbereiche/Umwelt-Recyclingtechnik/Pipi-Energiequelle-Toilette-Urin-Strom-fuer-Fluechtlingslager> (16. 12. 2016).
- Schröter, C. (2013): *Das Erfolgsgeheimnis der Homöopathie*. Norderstedt: Books on Demand, 138.
- Schwendenwein, I. (2017): Expertinneninterview zur Zusammensetzung des Pferdeharns. Leitung Labordiagnostik der Vetmeduni Vienna, Wien (08. 03. 2017).
- Synlab (s.a): Urinuntersuchung. Online: [http://synlab.com/fileadmin/user\\_upload/general/PDF/vet\\_Fachinfos/FI-Urinuntersuchung\\_web.pdf](http://synlab.com/fileadmin/user_upload/general/PDF/vet_Fachinfos/FI-Urinuntersuchung_web.pdf) (24. 11. 2016).
- TERRAM EQUITECHNOLOGY (2016): Das System. <http://terram.at/> (21. 12. 2016).
- Thomsen, J. (2014): [YouTube-Video.]. Interview geführt von Thierry Berrod und Quincy Russell, veröffentlicht am 09.12.2014 unter <https://www.youtube.com/watch?v=mywuc90C3gU> (12. 04. 2017).
- UCPTE (1994): *Yearly Report 1993, Union pour la coordination de la production et du transport de l'électricité*, Wien, Österreich.

- Udert, K. M. (2016): Experteninterview zu den Messergebnissen des Pferdeurins. Gruppenleiter der Eawag, Wien (15. 11. 2016).
- Udert, K. M. (2017): Experteninterview zum Energieverbrauch der Destillation. Gruppenleiter der Eawag, Wien (22. 03. 2017).
- Udert, K., Donahue, P. und Messmer, U. (2014): Producing Fertilizer from Urine. [YouTube-Video.]. Interview geführt von Donahue P., veröffentlicht am 26. 03. 2014 unter <https://www.youtube.com/watch?v=RGsP9n7dvy8> (16. 03. 2017).
- Udert, K. M., Fux, C., Münster, M., Larsen, T. A., Siegrist, H. und Gujer, W. (2003): Nitrification and autotrophic denitrification of source-separated urine. 48(1), 119 – 130.
- Udert, K. M. und Hug, A. (2012): Struvite precipitation from urine with electrochemical magnesium dosage. Water Research 47, 289 – 299.
- Udert, K.M., Larsen, T.A. und Gujer, W. (2006): Fate of major compounds in source-separated urine. Water Science and Technology 54 (11-12), 413 – 420.
- Udert, K. M. und Wächter, M. (2012): Complete nutrient recovery from source-separated urine by nitrification and distillation. Water Research 46(2), 453 – 464.
- Welch by Gardner Denver Thomas GmbH (2016): Betriebsanleitung Labor-Vakuumsysteme, ecoflex LVS 210 T ef.
- Yoneda, Y. (2010): Researcher Grows Durable “Bio Bricks” From Sand, Bacteria, and Urea. Online: <http://inhabitat.com/researcher-grows-durable-bio-bricks-from-sand-bacteria-and-urea/> (17. 12. 2016).
- Zeyner, A., Romanowski, K., Vernunft, A., Harris, P., Müller, A. M., Wolf, C. und Kienzle, E. (2017): Effects of Different Oral Doses of Sodium Chloride on the Basal Acid-Base and Mineral Status of Exercising Horses Fed Low Amounts of Hay. PLOS ONE. 1 – 15.

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Trinkwassermenge in Abhängigkeit von Witterung und Gewicht pro Pferd.....	4
Tabelle 2: Referenzbereiche – Pferd .....	5
Tabelle 3: Durchschnittliche Zusammensetzung von Pferdeurin (Zeyner, 2017, 7).....	6
Tabelle 4: Vergleich Pferdeurin (Udert, 2016) und menschlicher Urin (Udert et al., 2006) .....	7
Tabelle 5: SWOT-Analyse: Dünger .....	12
Tabelle 6: Bestandteile Presomen® / Tablette (Mylan Healthcare GmbH, 2016).....	14
Tabelle 7: SWOT-Analyse: Östrogenpräparat .....	15
Tabelle 8: Vergleich Energie- und Wasserstoffkosten von Harnstoff und Wasser (Boggs et al., 2009, 4861) .....	16
Tabelle 9: SWOT-Analyse: Wasserstoff .....	18
Tabelle 10: SWOT-Analyse: Strom.....	19
Tabelle 11: SWOT-Analyse: Globuli .....	20
Tabelle 12: SWOT-Analyse: Trinkwasser .....	21
Tabelle 13: SWOT-Analyse: Baumaterial .....	22
Tabelle 14: SWOT-Analyse: Injektionen .....	23
Tabelle 15: Vergleich von IrO <sub>2</sub> , BDD und Graphit (Etter et al., 2015, 13) .....	32
Tabelle 16: Parameter, MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex (Welch, 2016, 18).....	39
Tabelle 17: Parameter, LABOROTA 4000 efficient (Heidolph, 2008, 33).....	40
Tabelle 18: Anwendungsmodi, LVS - MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex.....	41
Tabelle 19: Versuch Nr. 1 .....	43
Tabelle 20: Versuch Nr. 2.....	44
Tabelle 21: Versuch Nr. 3.....	46
Tabelle 22: Versuch Nr. 4.....	47
Tabelle 23: Versuch Nr. 5.....	48
Tabelle 24: Versuch Nr. 6.....	50
Tabelle 25: Versuch Nr. 7.....	51
Tabelle 26: Eigenschaften von Wasser (Moyes und Schulte, 2006, 34) .....	54
Tabelle 27: Vergleichstabelle der Versuche 1 – 7.....	55
Tabelle 28: Resultate der destillierten Proben (in mg/L) .....	60

## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stallbodenkonstruktion.....	8	
Abbildung 2: Stallbodenkonstruktion (Aufsicht) (Terram, 2016) .....	9	
Abbildung 3: Stallbodenkonstruktion (Schnitte) (Terram, 2016) .....	9	
Abbildung 4: Winnipeg "Pee Farm" (Allin, 2013).....	13	
Abbildung 5: Elektrochemischer Prozess (Boggs et al., 2009, 4859) .....	16	
Abbildung 6: Pilotanlage zur Urinaufbereitung, Eawag (Maurer, 2007, 21) .....	24	
Abbildung 7: Fließbild Düngerherstellung (Nitrifikation → Destillation).....	24	
Abbildung 8: Nitrifikationsanlage (Etter et al., 2015, 6) .....	25	
Abbildung 9: Fließbild Nitrifikation .....	26	
Abbildung 10: Fließbild Destillation.....	27	
Abbildung 11: Phosphoreliminationsanlage (Larsen und Lienert, 2007, 13) .....	28	
Abbildung 12: Fließbild Phosphorelimination .....	29	
Abbildung 13: Struvit (Larsen und Lienert, 2007, 13).....	30	
Abbildung 14: Fließbild Elektrolyse.....	31	
Abbildung 15: Fließbild Nanofiltration .....	33	
Abbildung 16: Fließbild Umkehrosmose .....	34	
Abbildung 17: Fließbild Elektrodialyse .....	35	
Abbildung 18: Fließbild Ozonierung.....	36	
Abbildung 19: Destillationsanlage.....	38	
Abbildung 20: Anwendungsbeispiel - LVSp ecoflex .....	41	
Abbildung 21: Einstellbare Modi - MPC 201 Tp. für LVSp ecoflex .....	42	
Abbildung 22: Messung des pH-Wertes .....	43	
Abbildung 23: Schäumender Urin.....	45	
Abbildung 24: Primärdünger im Verdampferkolben .....	45	
Abbildung 25: Destilliertes Wasser im Auffangkolben.....	46	
Abbildung 26: Energiemessgeräte Voltcraft.....	49	
Abbildung 27: Rotationsverdampfer.....	49	
Abbildung 28: Gelagerter Pferdeurin	Abbildung 29: Destillierter Pferdeurin .....	52
Abbildung 30: Vergleich der Versuche 1 – 3.....	52	
Abbildung 31: Vergleich der Versuche 4 – 7.....	53	
Abbildung 32: Vergleich Energieverbrauch (in kWh).....	57	
Abbildung 33: Vergleich gemessener vs. berechneter Energieverbrauch (in kWh) .....	58	