

**Rekombinante Spinnenseide als
nachhaltiges Biomaterial –
Prozessanalyse und Bewertung anhand eines
bio-inspirierten Staubbeutels**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Anja Yvonne Lauterbach, MBE

aus

Hof, Bayern

Erstgutachter:

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Scheibel

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Frank Döpfer

Tag der mündlichen Prüfung:

18.01.2021

Lehrstuhl Biomaterialien
Universität Bayreuth
2021

1	EINFÜHRUNG IN DIE FRAGESTELLUNG.....	1
1.1	Aufbau der Arbeit dargestellt in einer Seite	1
1.2	Motivation und Zielsetzung	2
1.3	Hintergrund zur Entstehung dieser Dissertation	3
2	GRUNDLAGEN DER ARBEIT	4
2.1	Spinnenseide als biogenes Material.....	4
2.1.1	Von der Spinne zur artifiziellen Spinnenseide.....	4
2.1.2	Hochskalieren von Produktionsprozessen	6
2.1.3	Morphologien und Einsatzmöglichkeiten artifizieller Spinnenseide.....	7
2.2	Elektrospinning für Filterapplikationen	8
2.2.1	Herstellung von Submikrovliesen durch Elektrospinning.....	8
2.2.2	Elektrogesponnene Vliese für die Verwendung im Staubbeutel	9
2.3	Untersuchung der Nachhaltigkeit mittels Ökobilanzierung.....	11
2.3.1	Ökobilanzielle Betrachtung	12
2.3.2	Software Umberto und Datenbank ecoInvent.....	13
2.3.3	Auswertungsmethoden.....	15
2.3.4	Hintergrund zur Ökobilanzierung technischer Fasern und bioverfahrenstechnischer Produktionsprozesse	16
3	MATERIAL UND METHODEN	19
3.1	Verwendete Materialien	19
3.1.1	Chemikalien und Spinnenseidenprotein	19
3.1.2	Sonstige Materialien	19
3.1.3	Geräte und Software	19
3.1.4	Zusammensetzung der Nährmedien für die Auslegung der Fermentation für die ökobilanzielle Betrachtung.....	20
3.2	Verwendete Labormethoden	20
3.2.1	Herstellung organischer Lösungen für das Elektrospinning.....	20
3.2.2	Elektrospinning.....	21
3.2.3	Nachbehandlung	21
3.2.4	Luftdurchlässigkeitsmessung.....	21
3.2.5	Rasterelektronenmikroskopie	22
3.3	Berechnungsmethoden	22
3.3.1	Fermentation	22
3.3.1.1	Berechnung der Zellmasse bei der Fermentation.....	22
3.3.1.2	Berechnung der freigesetzten Wärmemenge	22
3.3.1.3	Berechnung der Leistungsdichte eines Rührers in einem Fermenter.....	23

3.3.1.4	Leistungsaufnahme von Rührwerken	24
3.3.2	Elektrische Leistung.....	25
3.3.3	Filtration.....	25
3.3.3.1	Formeln zur Berechnung bei der Diafiltration.....	25
3.3.3.2	Formeln zur Berechnung des Aufkonzentrierens	25
3.3.3.3	Zielproduktreinheit	26
3.3.3.4	Berechnung von Filterflächen.....	26
3.3.3.5	Berechnung des Produktverlusts an Filterflächen.....	26
3.3.4	Berechnung der notwendigen Substratmasse bei einer Fermentation über die Reaktionsgleichung.....	26
3.3.5	Berechnung der Konzentration über Stoffmenge und Volumen.....	27
3.3.6	Leistungsaufnahme bei der Filtration	27
3.3.7	Stromaufnahme von Pumpen.....	27
3.3.8	Berechnung des Raumvolumens zum Verdampfen eines Lösungsmittels	28
3.3.9	Berechnung der Wärmemenge.....	28
3.3.10	Wärmedurchgangskoeffizient einer ebenen Wand	28
3.3.11	Berechnung des Wärmeverlustes über eine Oberfläche	29
3.3.12	Verwendete Chemische Grundformeln.....	29
3.3.13	Pinch-Analyse	30
3.4	Ökobilanzielle Betrachtung	30
3.4.1	Wirkungsabschätzung mit CML2001	31
3.4.2	Wirkungsabschätzung des Klimawandels mit IPCC2007	32
3.4.3	Wirkungsabschätzung des Ozonabbaus mit EDIP2003.....	32
3.4.4	Wirkungsabschätzung der Human- und Ökotoxizität mit USEtox.....	32
3.4.5	Kumulierter Energieaufwand.....	33
3.4.6	Für Diskussion ausgewertete Kategorien.....	34
3.4.7	Allokationen.....	35
4	ETABLIERUNG VON SPINNENSEIDEN-SUBMIKROFILTERN	36
4.1	Erste Untersuchungen von Trägermaterialien für Filtergewebe	36
4.1.1	Vergleich von verschiedenen Trägermaterialien für das Elektrosponning.....	36
4.1.2	Untersuchungen zu geeigneten Trägermaterialien für den Einsatz im Staubbeutel.....	38
4.2	Spinnparameter für Elektrosponning auf geeigneten Trägermaterialien	39
4.2.1	Einfluss von Ammoniumsulfat in der Spinnlösung auf die Qualität der Fasern.....	40
4.2.2	Elektro-Spinnparameter für PA-Gewebe.....	41
4.2.3	Elektro-Spinnparameter für PET-Volumenvlies.....	42
4.2.4	Elektro-Spinnparameter für PP-Volumenvlies	43
4.2.5	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	43

4.3	Aufbau eines Spinnenseiden-Submikrofilters als Staubbeutel.....	46
4.3.1	Herstellung eines Spinnenseiden-Submikrogewebes durch Elektrospinning.....	46
4.3.2	Messung der Luftdurchlässigkeit und Filtereffizienz-Tests	47
4.3.3	Konzeption des Prototyps	48
4.4	Zusammenfassung	49
5	DATENERHEBUNG ZUR BETRACHTUNG DER NACHHALTIGKEIT	50
5.1	Anlagenauslegung Spinnenseidenprozess.....	50
5.1.1	Auslegung des Hauptequipments der Produktionsanlage.....	51
5.1.1.1	Fermentation und Fermenterauslegung.....	53
5.1.1.2	Wärmeentstehung im Fermenter.....	54
5.1.1.2.1	Sauerstoffbedarf.....	54
5.1.1.2.2	Wärme durch Stoffwechsel.....	55
5.1.1.2.3	Berechnung der Rührerleistung	56
5.1.1.3	Separator	59
5.1.1.4	Zellaufschluss	60
5.1.1.5	Filtration.....	60
5.1.1.5.1	Abschätzung des Verlusts an Protein durch Durchtritt durch die Membran	64
5.1.1.5.2	Abschätzung des Verlusts an Protein durch Adsorption an der Membran	65
5.1.1.5.3	Einfluss des Verbrauchs an Filtermaterial	65
5.1.1.6	Sprühtrocknung.....	66
5.1.1.7	Größe der Prozessbehälter	66
5.1.2	Stofflicher In- und Output.....	67
5.1.2.1	Fermentation	67
5.1.2.2	Proteinreinigung.....	67
5.1.2.3	Sterilisation und Reinigung des Prozessequipments.....	68
5.1.2.4	Abwasser.....	71
5.1.2.4.1	Harnstoffhaltige Abwasserfraktion und Harnstoffrecycling.....	72
5.1.2.4.2	Zusammensetzung des Abwassers von Ernte und Filtration	72
5.1.2.4.3	Abwasser des SIP und CIP der Equipment-Reinigung.....	75
5.1.3	Energetischer In- und Output.....	76
5.1.3.1	Strombedarf und erzeugte Wärme	76
5.1.3.1.1	Strombedarf und erzeugte Wärme der Rührwerke	76
5.1.3.1.2	Strombedarf und erzeugte Wärme bei der Filtration	77
5.1.3.1.3	Strombedarf Pumpen	78
5.1.3.1.4	Strombedarf und erzeugte Wärmemengen weiterer Geräte.....	79
5.1.3.1.5	Filtration von harnstoffhaltigem Abwasser	80
5.1.3.1.6	Alternatives Szenario zur Entsorgung des Abwassers.....	80
5.1.3.2	Weitere Wärmemengen im Prozess und Pinch-Analyse	80
5.1.3.3	Zusammenfassung der Energien pro 5 m ³ Batchvolumen.....	82
5.1.4	Zusammenfassung der Anlagenauslegung.....	83

5.2	Spinnenseide in der Anwendung als Submikrogewebe in einem Staubbeutel.....	87
5.2.1	Untersuchungsrahmen des Spinnenseiden-Submikrogewebes	88
5.2.2	Elektrospinning zur Erzeugung des Submikrogewebes.....	89
5.2.3	Spinnenseiden-Submikrogewebe im Staubbeutel.....	94
5.3	Zusammenfassung der Datenerhebung	94
6	MODELLIERUNG IN UMBERTO.....	95
6.1	Modellierung der Herstellung des Spinnenseidenproteins	96
6.1.1	Modellierung des Herstellungsprozesses.....	96
6.1.2	Vorketten.....	100
6.1.2.1	Materialien	101
6.1.2.2	Energien, Prozessmedien und Transport.....	103
6.1.2.3	Abwasserbehandlung	104
6.1.3	Betrachtete Gutschriften	106
6.1.4	Variation bestimmter Prozessparameter	109
6.1.4.1	Zellernte mit kleinen Separatoren.....	109
6.1.4.2	Filtrationsschritt mit Rohrmodul.....	110
6.1.4.3	Clean-in-Place ohne Wärmerückgewinnung beim Steam-in-Place.....	112
6.1.4.4	Einfluss der Ausbeute auf die Gesamtbilanz	113
6.2	Modellierung der Herstellung eines bio-inspirierten Seidenfilters	113
6.2.1	Modellierung des Spinnenseiden-Submikrogewebes	113
6.2.2	Modellierung der Gutschrift wegen Materialeinsparung.....	115
6.3	Zusammenfassung der Modellierung.....	116
7	ERGEBNISSE DER BETRACHTUNG DER NACHHALTIGKEIT.....	120
7.1	Ergebnisse der Herstellung künstlicher Spinnenseide	120
7.1.1	Grundbetrachtung	120
7.1.1.1	Ergebnisse der Sachbilanz	120
7.1.1.2	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	122
7.1.1.2.1	Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseide	122
7.1.1.2.2	Einfluss des Harnstoff-Recyclings.....	122
7.1.1.2.3	Wirkungsabschätzung der eingesetzten Rohstoffe, Energien und Prozessmedien.....	125
7.1.1.2.4	Fehleranalyse der verschiedenen Rohstoffe, Energien und Prozessmedien .	130
7.1.1.2.5	Sensitivitätsanalyse und daraus resultierende Empfehlungen	136
7.1.2	Ergebnisse der Gutschrift zur Entsorgung des Abwassers	138
7.1.2.1	Sachbilanz und Wirkungsabschätzung	138
7.1.2.2	Bewertung der möglichen Verwendung des Prozessabwassers als Düngemittel.....	142
7.1.3	Bilanzdaten bei Variation bestimmter Prozessparameter	144
7.1.3.1	Zellernte mit kleinen Separatoren.....	144

7.1.3.2	Filtrationsschritt mit Rohrmodul.....	145
7.1.3.3	Einfluss des Filtermaterials auf die Bilanzdaten der Filtration.....	148
7.1.3.4	Clean-in-Place ohne Wärmerückgewinnung beim Steam-in-Place.....	149
7.1.3.5	Änderung des Produktionstitors.....	150
7.1.4	Zusammenfassung der Betrachtung der Herstellung künstlicher Spinnenseide	151
7.1.4.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung der Herstellung künstlicher Spinnenseide.....	151
7.1.4.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Gutschrift zur Entsorgung des Abwassers als Düngemittel.....	152
7.1.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse bei Variationen der Prozessdurchführung.....	153
7.1.4.4	Empfehlung zur Verbesserung der Werte in den Wirkungskategorien	154
7.2	Ergebnisse der Betrachtung des Spinnenseidengewebes im Staubbeutel.....	155
7.2.1	Ergebnisse der Sachbilanz	155
7.2.2	Ergebnisse der Wirkungsabschätzung	156
7.3	Ergebnisse im Vergleich zu Polyamid 6,6.....	158
7.3.1	„Eins-zu-Eins“ Vergleich	158
7.3.2	Vergleich bezogen auf die Materialdaten.....	160
7.3.3	Fazit zum Vergleich der Herstellung von Spinnenseide mit Polyamid 6,6.....	161
8	DISKUSSION.....	162
8.1	Einfluss verwendeter Methoden zur Wirkungsabschätzung.....	162
8.2	Einfluss verwendeter ecoInvent Datensätze	162
9	ZUSAMMENFASSUNG	165
10	SUMMARY	167
11	LITERATURVERZEICHNIS.....	169
12	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	178
13	TABELLENVERZEICHNIS.....	179
14	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND KONSTANTE GRÖßEN	182
15	ANHANG.....	185
	Anhang A Daten zu Wachstum und Volumenzunahme im 100.000 l Fermenter	185
	Anhang B Daten zu Wachstum und Sauerstoffverbrauch im 100.000 l Fermenter.....	186
	Anhang C Daten zum Wachstum und Sauerstoffverbrauch in den Vorfermentern.....	188
	Anhang D Daten zu Wachstum, Leistungsdichte, Begasungsrate und Stoffübergangskoeffizient im 100.000 l Fermenter	188
	Anhang E Berechnung der Gesamtmenge an Glucose	189

Anhang F	Daten zu Wachstum, Stromverbrauch und Wärmeeintrag im 100.000 l Fermenter	190
Anhang G	Berechnung der Leistungsdichte des Rührers im Fermenter	191
Anhang H	Mengen an Medien und Rohstoffen bei der Fermentation	193
Anhang I	Zusammenfassung der Parameter der Fermentation.....	194
Anhang J	Berechnung der Mengen für die Lösungen der Proteinreinigung.....	195
Anhang K	Weitere Medien – Berechnung pro m ³	196
Anhang L	Berechnung der Volumenzunahme durch Harnstoffzugabe bei Filtration 2	197
Anhang M	Untersuchung unterschiedlicher Filtermedien bei der Filtration	197
Anhang N	Abschätzung der Dichte des Keramikfilters	202
Anhang O	Sterilfilter für Glucose	202
Anhang P	Berechnung Harnstoffkonzentration der Abwasserfraktion	203
Anhang Q	Berechnung zur Abwasserbehandlung der Ernte und Filtration	203
Anhang R	Berechnung weiterer Wärmemengen im Prozess	207
Anhang S	Adsorptionsisotherme von Isopropanol an Aktivkohle	211
Anhang T	Unsicherheiten von ecoInvent Datensätzen	211
Anhang U	Abbildung des Moduls der Vorketten.....	212
Anhang V	Verwendete Datenmodule von Umberto und ecoInvent, sowie Sachbilanz-Datenherkunft	214
16	TABELLENVERZEICHNIS ANHANG	225
17	DANKSAGUNG.....	226
18	ERKLÄRUNG	226
19	LEBENS LAUF.....	227

1 EINFÜHRUNG IN DIE FRAGESTELLUNG

1.1 Aufbau der Arbeit dargestellt in einer Seite

Rekombinanten Spinnenseide als nachhaltiges Biomaterial – Prozessanalyse und Bewertung anhand eines bio-inspirierten Staubbeutels
Kap. 1 Einführung in die Fragestellung Kap. 1.1 Aufbau der Arbeit Kap. 1.2 Motivation und Zielsetzung Kap. 1.3 Hintergrund zur Entstehung dieser Dissertation
Kap. 2 Grundlagen der Arbeit Kap. 2.1 Spinnenseide als biogenes Material Kap. 2.2 Elektrosponning für Filterapplikationen Kap. 2.4 Untersuchung der Nachhaltigkeit mittels Ökobilanzierung
Kap. 3 Material und Methoden Kap. 3.1 Verwendete Materialien Kap. 3.2 Verwendete Labormethoden Kap. 3.3 Berechnungsmethoden Kap. 3.4 Ökobilanzielle Betrachtung
Kap. 4 Etablierung von Spinnenseiden-Submikrofiltern Kap. 4.1 Erste Untersuchungen von Trägermaterialien für Filtergewebe Kap. 4.2 Spinnparameter für Elektrosponning auf geeigneten Trägermaterialien Kap. 4.3 Aufbau eines Spinnenseiden-Submikrofilters als Staubbeutel Kap. 4.5 Zusammenfassung
Kap. 5 Datenerhebung zur Betrachtung der Nachhaltigkeit Kap. 5.1 Anlagenauslegung Spinnenseidenprozess Kap. 5.2 Spinnenseide in der Anwendung als Submikrogewebe in einem Staubbeutel Kap. 5.3 Zusammenfassung der Datenerhebung
Kap. 6 Modellierung in Umberto Kap. 6.1 Modellierung der Herstellung des Spinnenseidenproteins Kap. 6.2 Modellierung der Herstellung eines bio-inspirierten Seidenfilters Kap. 6.3 Zusammenfassung der Modellierung
Kap. 7 Ergebnisse der Betrachtung der Nachhaltigkeit Kap. 7.1 Ergebnisse der Herstellung künstlicher Spinnenseide Kap. 7.2 Ergebnisse der Betrachtung des Spinnenseiden-Submikrogewebes im Staubbeutel Kap. 7.3 Ergebnisse im Vergleich zu Polyamid 6,6
Kap. 8 Diskussion Kap. 8.1 Einfluss verwendeter Methoden zur Wirkungsabschätzung Kap. 8.2 Einfluss verwendeter ecoInvent Datensätze
Kap. 9 Zusammenfassung Kap. 10 Summary

1.2 Motivation und Zielsetzung

In der Überflussgesellschaft und dem Wirtschaftsboom nach dem zweiten Weltkrieg wurde lange Zeit vernachlässigt, dass die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen endlich und ein verantwortungsvoller Umgang mit der Natur notwendig sind, um die Lebensgrundlage zukünftiger Generationen zu gewährleisten. Durch Vorfälle, wie z.B. der Seveso-Katastrophe am 10. Juli 1976, bei der durch die Chemiefabrik „Icmesa“ wegen technischer Schwierigkeiten eine Dioxinwolke freigesetzt wurde, die alle Lebewesen im Umfeld massiv beeinträchtigte und z.B. dem Großfeuer am 01. November 1986 in einer Lagerhalle des Schweizer Chemieunternehmens Sandoz in Basel, woraufhin durch hochgiftiges Löschwasser der Rhein blutrot gefärbt war und ein nie gekanntes Fischsterben hervorgerufen wurde, wurde die Öffentlichkeit gegenüber nachlässigen Produktionsbedingungen und mangelnden Sicherheitsvorkehrungen sensibilisiert. Auch die drohenden Klimaveränderungen durch Abholzung von Regenwäldern und die Ausweitung von Wüsten begründeten einen Umbruch im Denken.

Im Brundtland Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung wurde 1987 das damals neue Paradigma formuliert, dass eine nachhaltige Entwicklung notwendig ist, welche die Bedürfnisse der heutigen Generation zufrieden stellt, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse zu beeinträchtigen:

*"Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs"*¹.

Im Jahr 1992 wurde die daraufhin entwickelte „*Deklaration von Rio über Umwelt und Entwicklung*“ von über 170 Ländern verabschiedet, die darauf basiert, „*dass ein wirtschaftlicher Fortschritt langfristig einzig und allein in Verbindung mit Umweltschutz möglich sei*“².

Seitdem hat sich der Nachhaltigkeitsgedanke stetig weiterentwickelt und auch das Bedürfnis danach, Nachhaltigkeit durch Quantifizierung von Umweltauswirkungen messbar zu machen. Es entwickelte sich ab dem Jahr 1993 die Methodik der Ökobilanzierung bzw. das Life Cycle Assessment, die 2006 in dem internationalen Standard, der DIN EN ISO 14040 und 14044, zusammengefasst wurde; diese beschreibt die normierte Durchführung einer Ökobilanz^{3,4}.

Bei der Entwicklung neuer Materialien wird heutzutage nicht mehr nur Wert auf verbesserte Eigenschaften beim Einsatz gelegt, ebenso soll untersucht werden, ob Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und soziale Auswirkungen über den ganzen Lebensweg des Produkts vorteilhaft gegenüber der Verwendung eines traditionellen Materials sind. Dazu muss der gesamte Lebenszyklus des Produkts inklusive Herstellung der notwendigen Rohstoffe und Entsorgungsverfahren betrachtet werden. Deswegen wurde in dieser Arbeit als neues Material künstlich erzeugte Spinnenseide im Vergleich zu Polymerfasern betrachtet. Bioinspirierte Materia-

lien, wie artifizielle Spinnenseide, können zukünftig wichtige Bestandteile von neuen Produkten sein. Artifizielle Spinnenseide verbindet die optimierten Eigenschaften von natürlichen Materialien mit modernen Methoden der Materialwissenschaften. Die These, dass die Verwendung von artifizieller Spinnenseide zur Nachhaltigkeit beiträgt, sollte jedoch fundiert überprüft werden.

1.3 Hintergrund zur Entstehung dieser Dissertation

Ziel dieser Dissertation war einerseits die Entwicklung eines Filtergewebes aus Spinnenseide für den Einsatz in einem Staubbeutel und andererseits eine anschließende bzw. gleichzeitige Untersuchung der Nachhaltigkeit des Einsatzes eines solchen Filtergewebes sowie der biotechnologischen Produktion von künstlicher Spinnenseide an sich. Für die spätere kommerzielle Nutzung der artifiziellen Spinnenseide sollte zu einem frühen Zeitpunkt durch eine Hochrechnung auf die zukünftige Produktionskapazität überschlagen werden, wie die Nachhaltigkeit der Spinnenseide im Vergleich zu anderen Materialien einzuschätzen ist, um sie bei geplanten Produktentwicklungen zu berücksichtigen und ökologisch sinnvollere Varianten favorisieren zu können.

Zur Untersuchung der Nachhaltigkeit wurde eine ökobilanzielle Betrachtung in Anlehnung an die ISO 14040/44 durchgeführt. Eine ökobilanzielle Betrachtung unterscheidet sich von einer Ökobilanz dadurch, dass kein kritisches Gutachten (*Critical Review*) durchgeführt wird. Das Vorgehen zur Durchführung der ökobilanziellen Betrachtung wurde mit Michael Steinfeld der Universität Bremen, Fachgebiet 10 – Technikgestaltung und Technologieentwicklung – im Jahr 2012 diskutiert, da am Lehrstuhl Biomaterialien kein Experte mit ausreichend Erfahrung vorhanden war. Michael Steinfeld war zu diesem Zeitpunkt bei Prof. Armin Gleich unter anderem regelmäßig für die Durchführung und Begutachtung von Ökobilanzen zuständig. Seine Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge wurden beim Abschluss der ökobilanziellen Betrachtung im Jahr 2013 berücksichtigt.

Die praktischen Arbeiten dieser Dissertation entstanden von Dezember 2008 bis August 2013. Nachfolgende Entwicklungen nach 2013 sind in der Arbeit nicht betrachtet. Dies betrifft insbesondere die Auslegung des biotechnologischen Produktionsprozesses nach Stand der Technik von 2013, sowie bei der Durchführung der ökobilanziellen Betrachtung die im Jahr 2013 üblichen Auswertemethoden. Im Rahmen der Dissertation wurde von mir die Auslegung eines 100.000 l Produktionsprozesses zur Erzeugung artifizieller Spinnenseide für die ökobilanzielle Betrachtung vorgenommen.

2 GRUNDLAGEN DER ARBEIT

2.1 Spinnenseide als biogenes Material

2.1.1 Von der Spinne zur artifiziellen Spinnenseide

Es gibt viele natürliche Fasermaterialien, die durch die evolutionären Prozesse auf ihre Einsatzbedingungen hin optimiert wurden und die die Eigenschaften heutiger künstlicher Fasern weit übertreffen. Spinnen haben sich in einer über 300 Mio. Jahre dauernden Evolution zu Seidenspezialisten entwickelt und besitzen mit ihrer Seide eine der stabilsten natürlichen Fasermaterialien. Auf der Welt gibt es über 48.000 bekannte Spinnen, von denen jede Art ihre speziellen „Rezepte“ für unterschiedliche Seidenfäden hat^{7,8,9,10,11,12,13}. Spinnenseiden können fester als Stahl und dehnbar wie Gummi sein, nur so kann das Netz aus Protein die Wucht des Aufpralls, wie z.B. eines Käfers mit voller Fluggeschwindigkeit, abfangen¹⁴.

Spinnenseide der europäischen Gartenkreuzspinne besitzt, je nach Spinnenseidentypus, eine Zähigkeit von durchschnittlich 150 MJ/m³, welche die Zähigkeit aller bekannten künstlichen und natürlichen Materialien, wie Kevlar, Nylon, Gummi, Stahl teilweise um ein Vielfaches übertrifft (siehe Tabelle 1). Die Zähigkeit beschreibt dabei die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch- oder Rissausbildung¹⁵. Spinnenseide zeigt somit das Potential in verschiedensten Anwendungen eingesetzt zu werden.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Spinnenseide im Vergleich zu anderen Materialien, übernommen von^{7,11,12,13, 15}

Material	Dichte [g/cm ³]	Zug- festigkeit [MPa]	E- Modul [GPa]	Deh- nung [%]	Zähig- keit [MJm ⁻³]
Spinnenseiden-Faden <i>A. diadematus dragline</i>	1,3	700	6	30	150
Seidenspinner-Faden <i>Bombyx mori cocoon</i>	1,3	600	7	10	70
Polyamid 6,6	1,1	950	5	18	80
Kevlar49 TM	1,4	3.600	130	2,7	50
Carbonfaser	1,8	4.000	300	1,3	25
Hochzugfester Stahl	7,8	1.500	200	0,8	6

Da die Gewinnung von Spinnenseidenfasern von lebenden Spinnen aufgrund deren territorialen und kannibalistischen Verhaltens keine wirtschaftlich hochskalierbare Methode darstellt, werden biochemische und biotechnologische Methoden genutzt, um Spinnenseide künstlich herzustellen (siehe Abbildung 1).

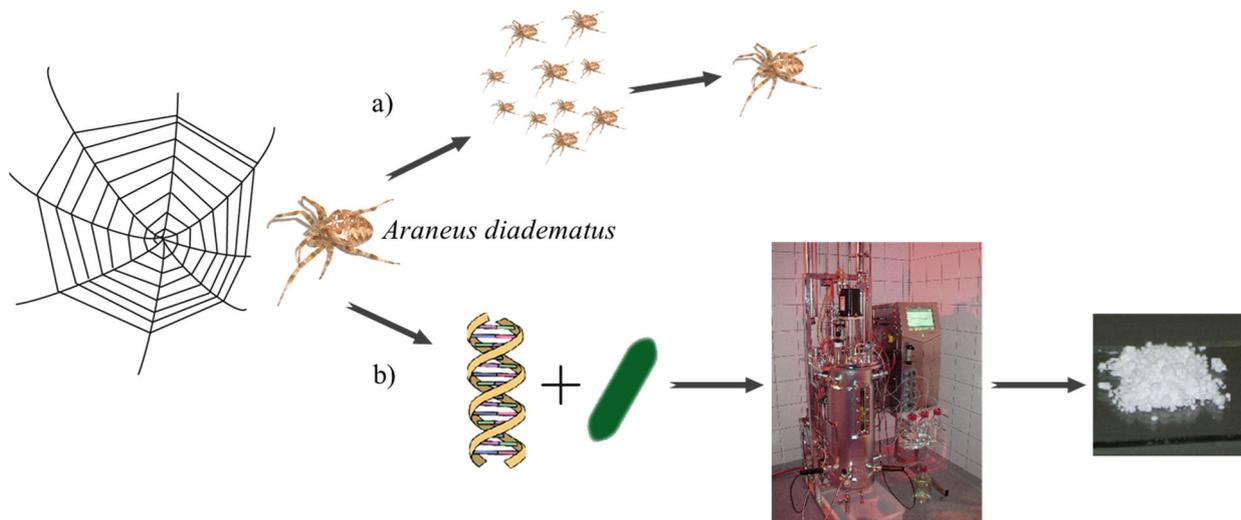


Abbildung 1: Von der Spinne zur künstlichen Spinnenseide

- a) Aufgrund von territorialem und kannibalistischem Verhalten von Spinnen ist die Zucht von Spinnen nicht wirtschaftlich
- b) Herstellung von künstlicher Spinnenseide in Pulverform mit Hilfe gentechnischer und biotechnologischer Methoden

Die biotechnologische Produktion von Spinnenseidenprotein erfolgt durch den gentechnisch modifizierten Mikroorganismus *E. coli*. Durch die gentechnische Modifizierung werden die *E. coli* Bakterien mittels eines Expressionssignals dazu gebracht, rekombinantes Spinnenseidenprotein, welches in die Bakterien-DNA eingefügt wurde, zu bilden. *Rekombinant* bedeutet, dass die DNA organismenfremd ist und deswegen die DNA des Spinnenseidenproteins durch gentechnische Methoden an die DNA des Produktionsorganismus angepasst werden muss, um so die Erzeugung eines künstlichen Spinnenseidenproteins im Produktionsorganismus zu ermöglichen¹⁷. Nach Abschluss der Fermentation, d.h. wenn die Bakterien sich ausreichend vermehrt und das Spinnenseidenprotein gebildet haben, werden die Bakterien vom Nährmedium mittels Zentrifugation getrennt. Um an das Spinnenseidenprotein im Bakterieninneren heranzukommen, wird die Zellwand der Bakterien mittels eines Aufschlussverfahrens, wie Hochdruckhomogenisation, zerstört. Anschließend werden die Zelltrümmer vom Überstand, der aus dem Inhalt der Bakterien und der künstlichen Spinnenseide besteht, durch Zentrifugation separiert. Da das Spinnenseidenprotein im Gegensatz zu einem Großteil der bakterieneigenen Proteine nicht durch Hitze bis 70° C denaturiert und aggregiert wird, kann durch Erhitzen des Überstandes der Großteil der Bakterienbestandteile in eine unlösliche Form überführt werden. Diese Methode nennt man auch Hitze-Denaturierung. In einem weiteren Zentrifugationsschritt wird die weiterhin lösliche Spinnenseide von den denaturierten Bakterienbestandteilen getrennt. Im Anschluss wird mit einem geeigneten Fällungsmittel (Salz) die Spinnenseide aus der Lösung gefällt und wiederum durch Zentrifugation von verbleibenden löslichen Bestandteilen des Bakteriums getrennt. Verbleibende Rückstände an Verunreinigungen im

gefällten Spinnenseidenprotein werden gelöst und vom Spinnenseidenprotein durch Zentrifugieren separiert. Anschließend wird das Spinnenseidenprotein gewaschen und dadurch die Salzreste entfernt. Das Spinnenseidenprotein wird abschließend z.B. durch Lyophilisation, getrocknet. Danach steht das Spinnenseidenprotein in Pulverform zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

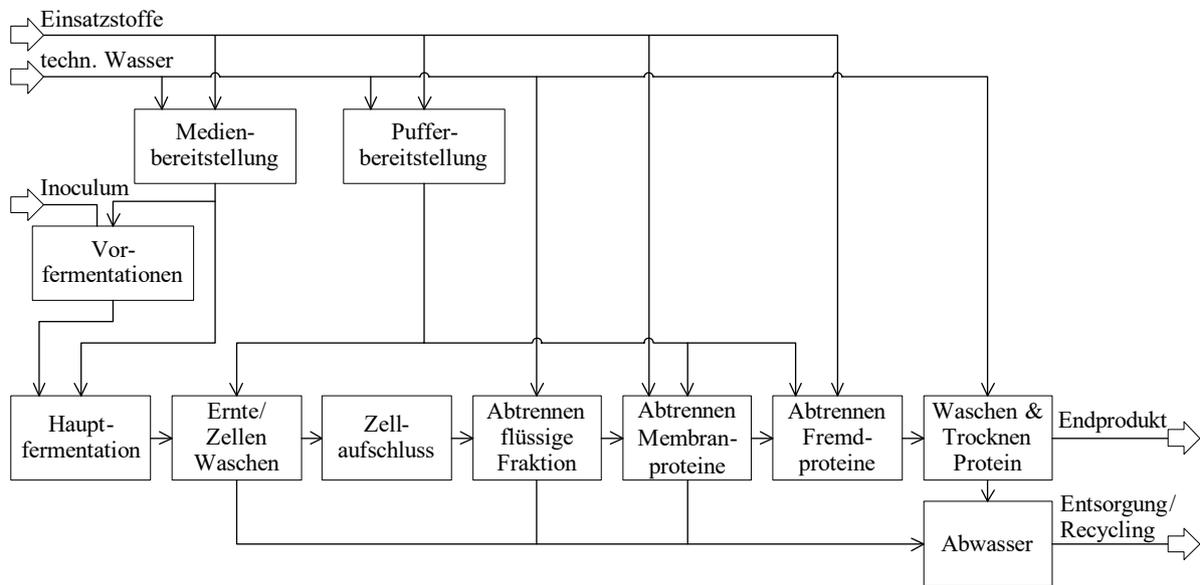


Abbildung 2: Grundfließbild der Herstellung von rekombinanter Spinnenseide

2.1.2 Hochskalieren von Produktionsprozessen

Mit Hochskalieren, bzw. Scale-Up, wird eine Methode bezeichnet, mit der „Verfahren aus dem Labor- bzw. dem Technikumsmaßstab in den industriellen Maßstab einer Produktionsanlage überführt werden“¹⁶. Diese Aufgabe stellt sich u.a. biotechnologischen Unternehmen regelmäßig, wenn ein im Labormaßstab entwickeltes Produkt seine Wirksamkeit gezeigt hat, bzw. für ein Produkt eine vielversprechende industrielle Anwendung identifiziert wurde, und die Erzeugung des Produkts in großen Mengen notwendig wird. Biotechnologisch interessante Produkte können eine große Bandbreite von Makromolekülen, angefangen von Vitaminen als Nahrungsergänzungsmittel, über Enzyme für den Einsatz in Waschmitteln oder auch verschiedenste Biopolymere, sein¹⁷. Je nach Art des Makromoleküls und in Abhängigkeit des Produktionsorganismus sind physikalische Grenzen beim Hochskalieren zu berücksichtigen, die einen großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Produktionsprozesses im großen Maßstab haben können¹⁶. Hierzu gehört beispielsweise die ausreichende und schnelle Wärmeabfuhr bei der Fermentation, da sonst die für die Produktion verwendeten Mikroorganismen entweder eine geringere Menge an Zielprodukt produzieren oder durch Überhitzung dauerhaft geschädigt werden können. Eine Möglichkeit, die Überhitzung bei der Fermentation von *E. coli*-Bakterien zu vermeiden, ist die Sauerstoffzufuhr auf ein Maß zu verringern, dass

das Wachstum gewährleistet ist, jedoch die dabei entstehende Wärmemenge, sowie die Wärmemenge durch Eintrag des Rührwerks, durch Kühlung abgeführt werden kann¹⁸.

Für den in dieser Arbeit betrachteten Produktionsprozess von artifizieller Spinnenseide in *E. coli*-Bakterien wurde zunächst eine Übertragung der Herstellungsmethoden von 500 ml auf 10 l im Labor durchgeführt (hier nicht beschrieben) und darauf aufbauend eine theoretische Hochskalierung auf einen 100.000 l Produktionsmaßstab durchgeführt, die in Kapitel 5 mit Angabe der betroffenen Annahmen ausführlich beschrieben ist.

Die Hochskalierung der Produktionsprozesse zur Erzeugung der artifiziellen Spinnenseide, mit den zur ökobilanziellen Betrachtung herangezogenen Stoff- und Energieflüssen, ist in Kapitel 5.1 beschrieben.

2.1.3 Morphologien und Einsatzmöglichkeiten artifizieller Spinnenseide

Das pulverförmige Spinnenseidenprotein kann, wie in Abbildung 3 dargestellt, zu verschiedenen Morphologien mit unterschiedlichen Anwendungsfeldern weiterverarbeitet werden. Die für die vorliegende Arbeit im Mittelpunkt stehende Morphologie ist die Vliesform mit Submikrofasern, die durch Elektrospinning erzeugt werden, kann (Erläuterung in Kapitel 2.2.2). Im ersten Schritt sind aufgrund von geringeren Produktionsmengen und hohen Produktionskosten die verschiedenen Morphologien für den Einsatz in der Medizintechnik interessant, im zweiten Schritt, bei entsprechend höheren Produktionsmengen und günstigerem Produktionspreis, ist auch ein Einsatz als Ersatzmaterial von Polymeren für technische Anwendungen denkbar.

Spinnenseide ruft beim Menschen keine allergischen oder entzündlichen Reaktionen hervor, weswegen Spinnenseide z.B. in Wundverschlussystemen (auch für Gefäße), Verbänden, Pflastern und als extrem dünnes Nahtmaterial für Augen- und Neurochirurgie eingesetzt werden kann⁵.

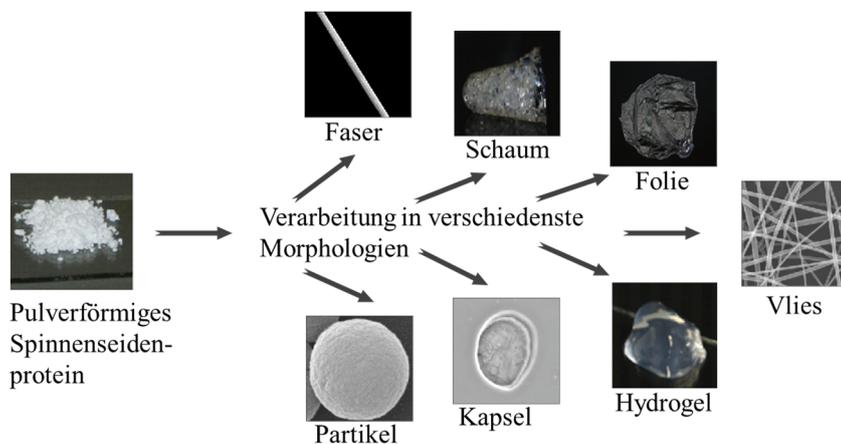


Abbildung 3: Herstellung unterschiedlicher Morphologien aus artifizieller Spinnenseide^{15,20}

2.2 Elektrospinning für Filterapplikationen

2.2.1 Herstellung von Submikrovliesen durch Elektrospinning

Beim elektrostatischen Spinnen, im Weiteren als Elektrospinning bezeichnet, wird in einem elektrischen Feld eine viskose Spinnlösung zu einer sehr dünnen Faser im Nano- bis Mikrometerbereich versponnen. Durch eine leitfähige Kapillare, z.B. eine Kanüle, die an die Elektrode einer Hochspannungsquelle angeschlossen ist, wird die Spinnlösung aus einem Reservoir in ein elektrisches Feld gespritzt. Die geladene Lösung bildet an der Spitze der Kanüle einen Taylorkonus, aus dem sich ein Strahl aufgrund der Ladungsdifferenz herauslöst und im elektrischen Feld zur Gegenelektrode gezogen und dabei beschleunigt und gestreckt wird. Die Gegenelektrode ist entweder geerdet oder es liegt eine entgegengesetzte Spannung an. Es bilden sich auf chaotische Weise spiralförmige Fasern, die durch Verdunsten des Lösungsmittels erstarren und sich auf dem mit der Gegenelektrode verbundenen Kollektor als ungeordnetes Vlies ablegen (siehe Abbildung 4)^{21,22}. Es können Faserdurchmesser 10 nm bis 10 μm erzeugt werden^{23,24}.

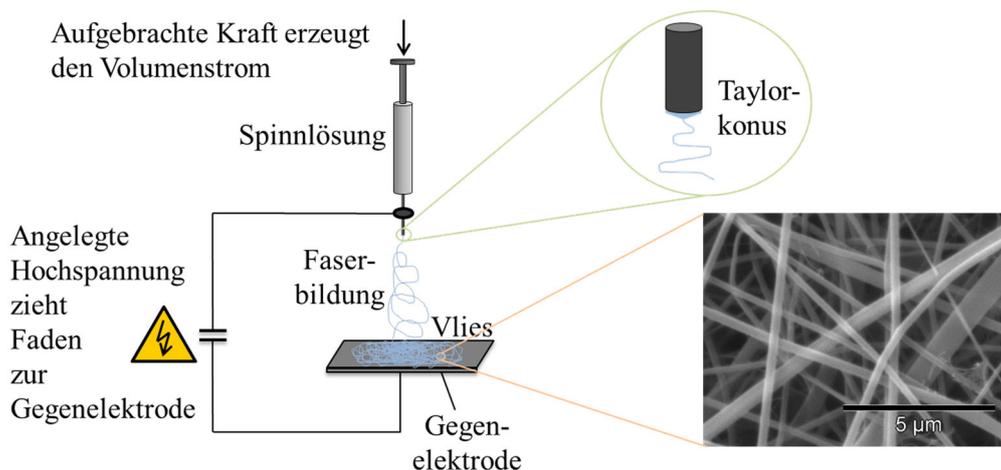


Abbildung 4: Darstellung des Prinzips des Elektrospinnings

Elektrospinning ist sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus technischer Sicht eine der vielseitigsten Methoden, um Submikrofasern aus verschiedensten Materialien herzustellen. Dabei kann die Morphologie der Fasern durch eine Variation der Spinnbedingungen für den gewünschten Einsatz, wie z.B. Filtermedien, Membranen, Textilien oder Medizinprodukte gesteuert werden²⁵. Submikrovliese zerreißen aufgrund der geringen Faserdurchmesser sehr leicht und werden deshalb üblicherweise auf ein Trägermaterial, wie z.B. Papier, gesponnen. Um ein Trägermaterial mit elektrogewonnenem Vlies zu beschichten, wird dieses einfach auf dem Kollektor positioniert.

2.2.2 Elektrogenespinnene Vliese für die Verwendung im Staubbeutel

In Staubsaugern mit Beutel werden drei Arten von Filtern eingesetzt: Staubbeutel, Motorschutzfilter und Ausblasfilter. Das Prinzip eines Staubsaugers mit Beutel beruht auf Unterdruck. Der Elektromotor betreibt ein Gebläse, welches den Unterdruck erzeugt. Durch ein Rohr wird der Schmutz aufgesaugt und in den Staubbeutel transportiert. Dieser soll Staubpartikel und weitere Verunreinigungen auffangen und verhindern, dass Staubpartikel wieder in die Umgebungsluft gelangen. Der Motorschutzfilter soll den Motor davor bewahren durch Partikel verunreinigt zu werden. Der Ausblasfilter erfüllt die Funktion, feinste Partikel aus der durch den Staubsauger geführten Luft zu entfernen. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass ein Drittel aller verkauften Staubsauger beutellos ist. Beutellose Staubsauger nutzen das Prinzip der Zentrifugalkraft, bei der sich die Partikel an der Innenwand eines Zylinders durch die Fliehkraft absetzen und die nach außen abgeführte Luft kaum Staubpartikel mehr enthält^{29,32}. Für Stauballergiker sind nur Staubsauger mit Filter geeignet, da bisher nur für diese HEPA-Filter als Ausblasfilter genutzt werden. Wegen der mehrfach gefalteten Vliesgitter wird die Ausblasluft wesentlich sauberer als die Raumluft, und ist somit für Stauballergiker geeignet³³.

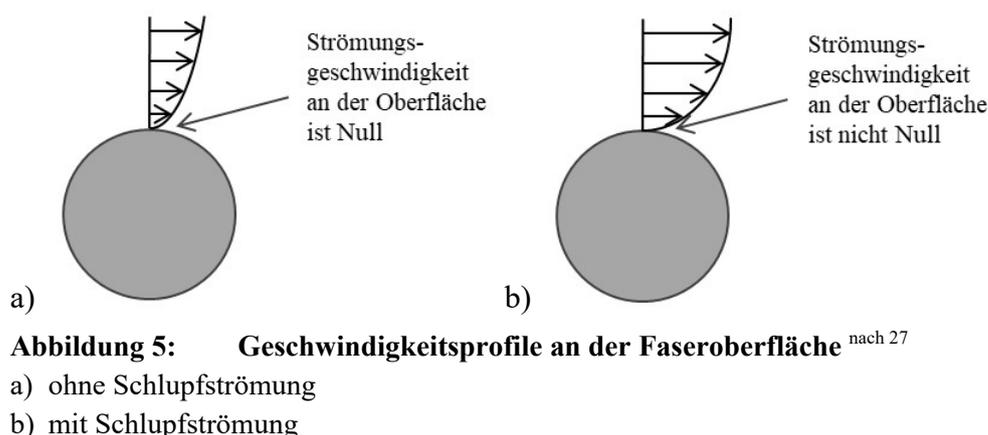
Um die Filterung in den drei Arten von Filtern zu erreichen, müssen geeignete Materialien eingesetzt werden. Materialien aus der Klasse der natürlichen Fasern sind zum Beispiel Cellulosefasern oder Protein-Fasern, sowie künstliche Fasern wie Nylon, Polyester, Polyethylen und viele mehr. Sie werden wegen ihrer guten Eigenschaften bezüglich Zugfestigkeit, Hitzebeständigkeit und Chemikalienresistenz verwendet. In der Herstellung werden zwei Arten unterschieden: Faservlies und gewebter Stoff. Die Vliesstoffe werden durch Hitze, Feuchtigkeit oder Druck erzeugt²⁶. Bei den gewebten Stoffen werden die Fasern zu Garn gesponnen. Dieses wird dann gewebt.

Größere Staubbeutel haben einen größeren Luftdurchsatz, was die Saugleistung verbessert, da mehr Luft durch den Beutel strömt und der Motor weniger Kraft aufwenden muss²⁷. Für die Saugkraft eines Staubsaugers sind der Volumenstrom, die Geschwindigkeit der Luft und die Druckdifferenz maßgeblich²⁹. Durch Strömungsoptimierung kann erreicht werden, dass mit geringerer Wattzahl (= geringerem Stromverbrauch) eine ebenso gute Saugleistung erzielt wird³⁰. Die Ökodesign-Verordnung für Staubsauger – (EU) Nr. 666/2013 – legt fest, dass seit dem 01.09.2017 die Nennleistungseinspeisung nur noch max. 900 W betragen darf³¹. Dadurch waren die Hersteller verpflichtet den Stromverbrauch bei gleicher Leistung entsprechend zu reduzieren. Neben der Festlegung der maximalen Nennleistungseinspeisung wurden auch Mindestwerte für Staubaufnahme in Abhängigkeit der Bodenart und Maximalwerte für Staub-

und Lärmemission definiert. Dadurch sind Staubsauger-Hersteller verpflichtet, ihre Geräte und die dazugehörigen Filter noch weiter zu optimieren.

Elektrogesponnene Polymere als Filterstoff haben sich nur begrenzt, bzw. gar nicht durchgesetzt, obwohl sie eine eindeutige Verbesserung der Filterleistung bei gleichzeitig erhöhter Luftdurchlässigkeit durch den geringeren notwendigen Energieeintrag zeigen. Dies könnte daran liegen, dass seitens der Verbraucher die Befürchtung besteht, dass sich submikroskalige Fasern, bzw. Submikropartikel, aus dem Filtermaterial lösen und vom menschlichen Organismus aufgenommen werden könnten. Es hat sich bislang gezeigt, dass der menschliche Organismus auf Spinnenseidenpartikel nicht nachweislich reagiert und sie auch nicht einkapselt, sondern vollständig abbaut⁵. Wegen dieser physiologischen Verträglichkeit erscheint Spinnenseide für die Verwendung als Submikromaterial in Filtersystemen geeignet. Sollten sich Teile der Faser aus dem Submikrovliesstoff ablösen, besteht nach derzeitigem Kenntnisstand dadurch kein Gefährdungspotential für Verbraucher. Vorangehende Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass seidenbasierte Submikrovliesstoffe in Filteranwendungen eine signifikant bessere Filterleistung in Kombination mit höherer Luftdurchlässigkeit im Vergleich zu bestehenden Filtersysteme zeigen²⁵.

Wie in Abbildung 5 visualisiert beruht die erhöhte Luftdurchlässigkeit von Submikrofasern gegenüber Mikrofasern auf dem Effekt der sogenannten Schlupfströmung. Bei Auftreten von Schlupfströmung ist die Geschwindigkeit an der Faseroberfläche nicht null, dadurch weisen Submikrofasern einen geringeren Druckverlust und somit eine höhere Luftdurchlässigkeit auf.



Wenn Partikel mit einer Luftströmung transportiert werden, wie Staub beim Staubsaugen, bleiben sie bei auftretender Schlupfströmung eher an der Faseroberfläche haften, da einerseits durch die fehlende Ablenkung von der Faseroberfläche weg die Wahrscheinlichkeit eines Kontakts zunimmt und andererseits durch die höhere Geschwindigkeit beim Aufprall der Partikel auf der Faseroberfläche diese eher haften bleiben (siehe Abbildung 6). In Abbildung 7 ist

zur besseren Veranschaulichung eine Aufnahme von Submikrofasern mit daran haftenden Partikeln und Mikrofasern (Trägermaterial) im Hintergrund zu sehen.

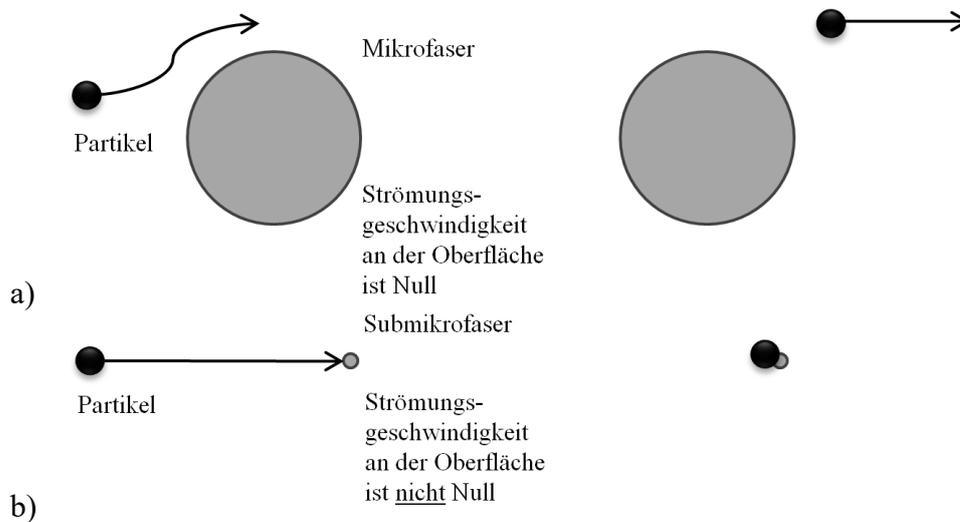


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Filterwirkung beeinflusst durch Schlupfströmung

- a) Ohne Schlupfströmung bei Mikrofasern: Partikel wird zusammen mit der Luftströmung abgelenkt und fliegt weiter
- b) Mit Schlupfströmung bei Submikrofasern: Partikel wird nicht abgelenkt, trifft auf die Faseroberfläche und bleibt hängen

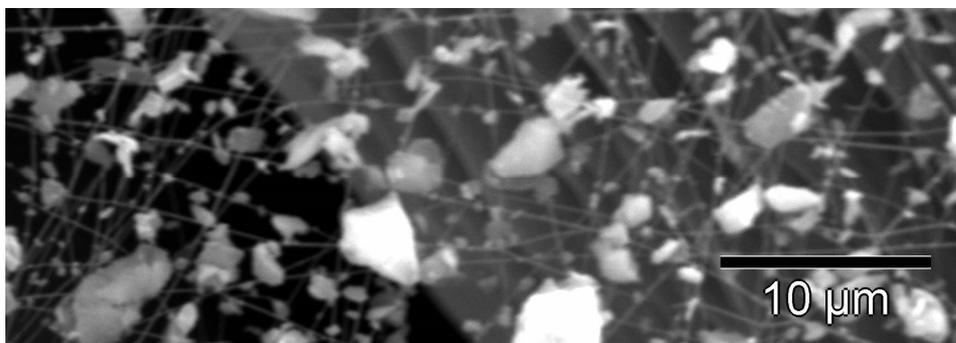


Abbildung 7: Aufnahme von Submikrofasern mit daran haftenden Partikeln und Trägermaterial (Mikrofaser) im Hintergrund

2.3 Untersuchung der Nachhaltigkeit mittels Ökobilanzierung

Um Möglichkeiten für die Verbesserung von Umwelteigenschaften eines Produktionsprozesses eines Produkts aufzuzeigen, wie z.B. bei der Entwicklung von Produkten und/oder als Unterstützung von strategischen Entscheidungen, wurde in den letzten Jahrzehnten die Methode der Ökobilanzierung stetig weiterentwickelt. Bei der Ökobilanzierung können die Umwelteigenschaften von Produkten in den verschiedenen Phasen des Lebenswegs dargestellt, analysiert und bewertet werden.

2.3.1 Ökobilanzielle Betrachtung

In der „ISO 14040:2006: Umweltmanagement – Ökobilanzen – Grundsätze und Rahmenbedingungen“ sind die Grundsätze beschrieben, nach denen eine Ökobilanz durchgeführt werden muss. Laut dieser Norm bezieht sich „die Ökobilanz [...] auf die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen [...] im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“).“ Die Anforderungen an die Erstellung von Ökobilanzen sind in der „ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“ beschrieben. In Abbildung 8 sind die Phasen einer Ökobilanz dargestellt².

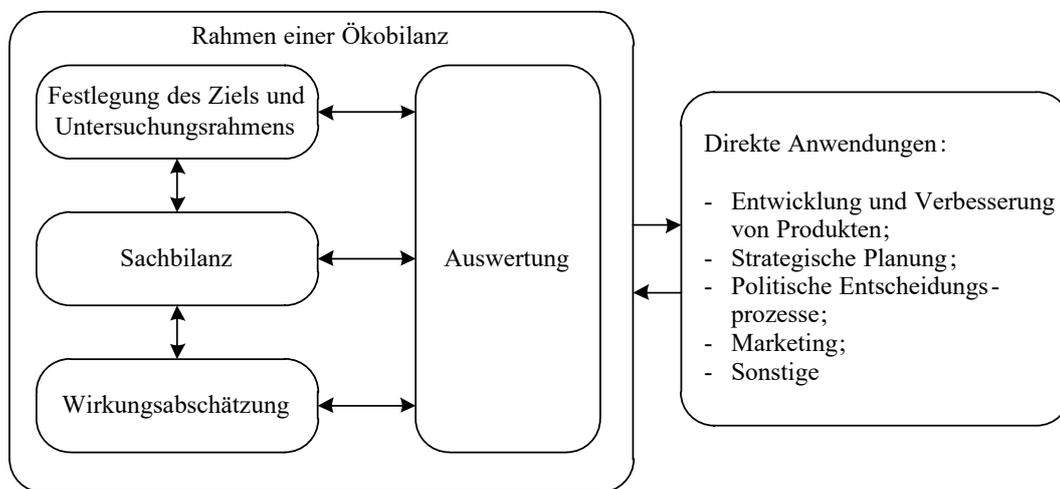


Abbildung 8: Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044

Die Erstellung einer Ökobilanz, bzw. einer ökobilanziellen Betrachtung, erfolgt wie in Abbildung 8 dargestellt, indem zunächst das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt werden. Dabei wird der Umfang der Betrachtung mit Systemgrenzen, notwendige Annahmen und Einschränkungen genau beschrieben. Im Anschluss werden für die Sachbilanz alle In- und Outputströme zur Erzeugung des zu betrachtenden Produkts zusammengetragen. Bei der Erfassung der Inputströme werden sowohl die Aufwendungen zur Erzeugung der Rohstoffe als auch die Aufwendungen zur Entsorgung der Outputströme berücksichtigt. Im Anschluss werden in der Wirkungsabschätzung mit verschiedenen Wirkungskategorien die Auswirkungen simuliert und können durch Auswertung und Vergleich verschiedene Szenarien analysiert, optimiert und damit eine Reduzierung negativer Umweltauswirkungen angestoßen werden.

Um die Komplexität realer Prozesse abbilden zu können, bietet es sich an zur Erstellung von Ökobilanzen eine professionelle Software zu verwenden. Es gibt verschieden Anbieter von kostenpflichtiger Ökobilanz-Software, die im europäischen Raum meist genutzt sind GaBi

von PE International⁴⁶, SimaPro von der GreenDelta GmbH⁴⁷ und Umberto von der Ifu-Hamburg GmbH⁴⁸ (in dieser Arbeit verwendet). Alle diese Programme bieten die Möglichkeit, Datensätze für Umweltdaten der ecoInvent-Datenbank zu nutzen (siehe auch 2.3.2).

Durch die Ökobilanzierung kann eine Produktionslinie, ein Werk oder ein gesamtes Unternehmen untersucht werden. Die Ergebnisse können nach ökologischen, wirtschaftlichen und auch sozialen Kriterien ausgewertet werden. Die Stoffflussdaten bieten gemeinsam mit den Kostendaten eine wertvolle Unterstützung für den Vergleich von Technologievarianten und die Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen⁴⁹.

Die ökobilanzielle Betrachtung, eine sogenannte „vereinfachte Ökobilanz“, wie sie in der vorliegenden Arbeit diskutiert wird, erfolgte entsprechend den Richtlinien der ISO 14040 und 14044. Eine vereinfachte Ökobilanz zeichnet sich dadurch aus, dass viele der notwendigen Daten der Sachbilanz aus Mangel realer Daten geschätzt oder berechnet werden⁵⁰.

Eine gewisse Herausforderung stellt die Betrachtung von Outputströmen „Abfälle zur Verwertung“ als Gutschrift, sogenannten Allokationen dar, um negative Umwelteinflüsse zu reduzieren. Es gibt drei mögliche Arten die Verwertung von Abfällen zu simulieren⁵¹:

- Abbildung eines Recyclings innerhalb der Systemgrenze
- Abbildung eines Closed-Loop-Recycling, bei dem ein Stofffluss innerhalb der betrachteten Systemgrenze als Sekundärrohstoff zurückgeschleust und wiederverwendet wird
- Abbildung eines Open-Loop-Recycling, bei dem ein Stoff innerhalb der Systemgrenzen als Abfall betrachtet wird und außerhalb der Systemgrenzen als potenzieller Sekundärrohstoff einen weiteren Nutzen erfüllen könnte

Ein Beispiel für ein Closed-Loop-Recycling ist z.B. die Rückführung von Altglas in die Glasschmelze und für ein Open-Loop-Recycling z.B. der Einsatz von PET-Flakes aus PET-Flaschen in der Textilindustrie. Die Voraussetzung für die Verwendung des Gutschriftenverfahrens ist die Prämisse, dass ein aufbereiteter Sekundärrohstoff einem Primärrohstoff funktionell äquivalent ist, sowie bei Open-Loop-Recycling, das Vorhandensein eines nachgeschalteten Produktsystems, das den Materialfluss als Sekundärrohstoff verwenden kann.

2.3.2 Software Umberto und Datenbank ecoInvent

Umberto ist eine Ökobilanz-Software der Ifu-Hamburg GmbH, mit der Prozesse abgebildet und Stoffstromflüsse modelliert, berechnet und visualisiert werden können. Prozesse können hierbei sowohl einzelne Verfahrensschritte als auch komplette Herstellungsprozesse und

Dienstleistungen sein. Jegliche Modellierung ist möglich, solange sie sich den Anforderungen der Software unterordnet. Im Netzeditor können sogenannte Transitionen, die Umwandlungsprozessen entsprechen, anlegt werden. Diese beschreiben dann jeweils einen Prozess und sind über Input- und Outputstellen sowie über Konnektoren mit anderen Transitionen verbunden (Abbildung 9). Eine Transition erhält durch Inputstellen Rohstoffe, wie Energien, Materialien oder Prozesse und gibt im Prozessmodul erzeugte Materialien, wie z.B. Emissionen oder das Endprodukt, über einen Konnektor an weitere Transitionen oder direkt an Outputstellen ab. Die Nummerierung der Transitionen, Stellen und Konnektoren erfolgt in Reihenfolge nach Anlage und kann nachträglich nicht geändert werden. Die Benennung von Transitionen kann nach Bedarf eingefügt und geändert werden. Sollen komplexere Prozesse abgebildet werden, die in der Hauptebene die Übersichtlichkeit beeinträchtigen würden, so können in Subnetzen wiederum Prozesse mit Transitionen abgebildet werden. Dadurch können Prozesse abgebildet werden, die mit allen benötigten Rohstoffen, Materialien, Prozessen und Energien versorgt werden und die dabei resultierenden Emissionen und Abfälle berücksichtigen. Es ergibt sich so die Möglichkeit, die im Prozess erzeugten Materialien und Produkte zu erstellen und zu verwalten. Der Vorteil der Modellierung mit einer Ökobilanz-Software ist, dass für jeden Prozessschritt die berechneten Faktoren in einer gut zu handhabender Größenordnung hinterlegt werden können. Wird im nachgeschalteten Prozessschritt z.B. 0,437 kg eines bestimmten Materials benötigt, kann die Berechnung des Prozessschritts zur Erzeugung dieses Materials für 1 kg oder 0,001 kg erfolgen, für den nachfolgenden Prozessschritt wird die benötigte Menge und die Berechnung des Vorprozesses angepasst und bilanziert. Es besteht auch die Möglichkeit, Stoffströme zurückzuführen und so intern im Prozess wieder zu verwenden. Ist der gewünschte Prozess vollständig abgebildet, kann die Berechnung der Stoffstromflüsse und dadurch gleichzeitig eine Überprüfung angelegter Beziehungen durchgeführt werden.

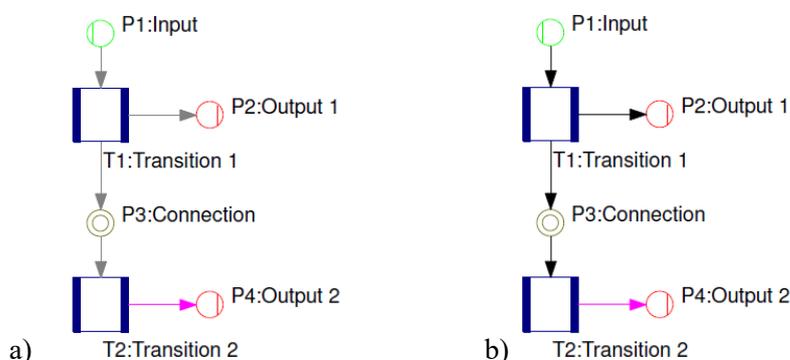


Abbildung 9: Einfaches Stoffstromnetz in Umberto

- a) nicht berechnet (graue Pfeile zwischen Input/Output/Connection & Transitionen), rosa Pfeil ist definierter Materialfluss
 b) berechnet (schwarze Pfeile)

In Umberto können externe Datenbanken, die Umweltdaten von Materialien, Energien und ganzen Prozessen enthalten, eingelesen werden und so die Umweltwirkung eines betrachteten Prozesses untersucht werden. Ebenso können zur Auswertung Auswertungsmethoden externer Datenbanken geladen und die Wirkungsabschätzungen durchgeführt werden. Bsp. einer solchen Datenbank ist ecoInvent^{52,53}.

Die Datenbank ecoInvent wird durch das EcoInvent-Center zur Verfügung gestellt (in der vorliegenden Arbeit wurde Version v 2.2 verwendet). Das EcoInvent-Center ist das Zentrum für Ökobilanzdaten der ETH Zürich (Swiss Federal Institute of Technology Zürich), der EPF Lausanne, des PSI (Paul Scherer Institutes), der Schweizer Empa (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research) und der Schweizer ART (Swiss Federal Research Station Agroscope Reckenholz-Tänikon) und wurde/wird vom Schweizer Bundesamt unterstützt. Das EcoInvent-Center beschäftigt sich seit mehr als 30 Jahren mit dem Aufbau einer umfangreichen, wissenschaftlich gut fundierten und transparenten Ökobilanz-Datenbank, um es zu ermöglichen, Produkte, Prozesse und Dienstleistungen umweltverträglicher zu gestalten. In der ecoInvent-Datenbank sind inzwischen mehrere tausend Sachbilanz-Datensätze enthalten.

In der Version v 2.2 existieren vier unterschiedliche Unterkategorien – Unit-Prozesse mit und ohne Berücksichtigung der Infrastruktur, sowie Result-Prozesse mit und ohne Berücksichtigung der Infrastruktur. Die Unit- und Result-Prozesse unterscheiden sich nur in der Darstellung, die resultierenden Rohstoffströme und Emissionen sind identisch. Bei den Unit-Prozessen sind die einzelnen Vorketten des jeweiligen Materials als Inputstrom hinterlegt. Der Begriff „Infrastruktur“ bezieht sich bei Ökobilanz-Datensätzen auf Strukturen, welche für die Bereitstellung des Materials benötigt werden, wie z.B. Straßen, Maschinen und/oder Gebäude. Für die Vollständigkeit von Ökobilanzbetrachtungen sollte die Infrastruktur der Prozesse enthalten sein, jedoch waren zum Zeitpunkt der Durchführung der ökobilanziellen Betrachtung (2013) bei vielen Materialien keine Daten zur Infrastruktur vorhanden und es wurden deshalb grundsätzlich die Datensätze ohne Infrastruktur verwendet, um keine ungleichmäßige Belastung beim Vergleich der Materialien zu erzeugen.

2.3.3 Auswertungsmethoden

Bei der Wirkungsabschätzung wird jedem Elementarfluss in der Sachbilanz ein oder mehrere Einflussfaktor(en) in den Wirkungskategorien zugewiesen.

Es gibt verschiedene Methoden, die Ergebnisse der Sachbilanz in Wirkungskategorien zu überführen. Das Auswertungsmodul CML2001 beruht auf einer veröffentlichten Anwendungsempfehlung einer Forschergruppe des „*Center of Environmental Science of Leiden Uni-*

versity“ des Jahres 2001 zur Umsetzung der ISO-Normen bei der Durchführung von Wirkungsabschätzungen^{54,55}. Diese Methode wird seitdem sehr häufig für die Beurteilung der wichtigsten Umweltauswirkungen eingesetzt.

In einer neueren Untersuchung der besten Methoden für die Charakterisierung bei Ökobilanzen wurden in der Veröffentlichung von Hauschild et al. 2013⁵⁶ die zurzeit verfügbaren Methoden verglichen und Empfehlungen ausgesprochen. Es wurden mehr Empfehlungen für mittelfristige Charakterisierungsmethoden als für mittel- bis längerfristige identifiziert. Für den mittelfristigen Klimawandel (*GWP 100a*) wurde die Methode des IPCC2007 (Intergovernmental Panel on Climate Change, Foster et al. 2007⁵⁷), für den Ozonabbau am Gleichgewicht (*ODP steady state*) die Methode des WMO (World Meteorological Organization, Daniel and Velders et al. 2007⁵⁸), für die Erschöpfung abiotischer Ressourcen die Methode CML2001 sowie für die Human- und Ökotoxizität die Methode des USEtox (UNSP-SETAC toxicity model, Rosenbaum et al. 2008⁵⁹) empfohlen. Nur die Werte des IPCC2007 für den Klimawandel und die des WMOs für den Ozonabbau werden mit „I (*recommended and satisfactory*)“ klassifiziert, der Wert der Erschöpfung abiotischer Ressourcen mit „II (*recommended but in need of some improvements*)“ und die Werte der Human- und Ökotoxizität mit „II/III (*recommended but in need of some improvements/recommended but to be applied with caution*)“. Bei der Auswertung der vorliegenden Dissertation wurden die bei Hauschild et al. 2013⁵⁶ empfohlenen Charakterisierungsmethoden, soweit möglich, mit denen des CML2001 verglichen. Eine weitere Methode, die als Orientierungsgröße in der vorliegenden Dissertation betrachtet wird, ist die Berechnung des kumulierten Energieaufwands.

2.3.4 Hintergrund zur Ökobilanzierung technischer Fasern und bioverfahrenstechnischer Produktionsprozesse

Die wenigsten synthetischen Fasermaterialien sind vollständig recyclebar oder nachhaltig herstellbar. Der Fasermarkt ist daher geprägt von auf fossilen Ressourcen basierenden Materialien, die sowohl bei der Produktion als auch bei der Entsorgung die Umwelt belasten. Spinnenseidenfasern könnten diese synthetischen Polymerfasern in vielen Bereichen ersetzen.

Bei der Entwicklung und dem Einsatz von Hochleistungsfasern spielte der Umweltaspekt in der Vergangenheit eine eher untergeordnete Rolle. Synthetische Fasern werden heute unter großem Energieaufwand sowie dem Einsatz fossiler Ressourcen und Erzeugung von häufig toxischen Abfallprodukten produziert. Dabei ist der Energieaufwand für die Faserproduktion im Vergleich zu anderen Produkten, wie Flaschen und Filmen, sehr viel höher³⁴. So wird zur Herstellung von 1 t PET ein Energieeinsatz von 81 GJ benötigt, bei der Weiterverarbeitung zu

einer Faser und anschließend zu einem Produkt, wie z.B. einem T-Shirt, müssen insgesamt 188 bis 325 GJ pro Tonne Produkt aufgewendet werden.

Im Folgenden findet sich die Begründung der Notwendigkeit einer eigenständigen ökologischen Betrachtung für die Herstellung artifizieller Spinnenseide:

In der Forschung wird das Thema Nachhaltigkeit bei der Produktion von Polymeren auf Basis nachwachsender Rohstoffe untersucht. Vor allem die Herstellung biologisch abbaubarer Polymere im Bereich der Verpackungsindustrie liegt im Fokus der industriellen Forschung. Es gibt einige biologisch abbaubare Polymere, wie PLA (Polymilchsäure), PVA (Polyvinylacetat) und PHA (Polyhydroxyalkanoat). PHA – ein natürlicher Polyester – ist das vielversprechendste Polymer, da es sich durch eine gute Festigkeit und Zähigkeit auszeichnet und seine Eigenschaften, wie Feuchtigkeitsbeständigkeit und Sauerstoffdurchlässigkeit, über einen weiten Bereich durch die Zusammensetzung eingestellt werden können³⁹. Die Erzeugung von PHA in *E. coli*-Zellen wurde sowohl hinsichtlich der ökonomischen Gesichtspunkte von Van Wegen et al.³⁹, als auch bezüglich der Nachhaltigkeit von Gerngross³⁹ untersucht. Bei Van Wegen et al. wurde gezeigt, dass es mit weiterer Prozessoptimierung möglich sein sollte, preislich konkurrenzfähiges PHA mit Produktionskosten von 2,67 \$/kg herzustellen. Gerngross hingegen zeigt auf, dass zur Erzeugung von PHA auf Basis nachwachsender Rohstoffe interessanterweise **mehr** fossiles Öl benötigt wird, als bei einem vergleichbaren Polymer wie Polystyrol – für 1 kg PHA werden 2,39 kg fossiles Öl benötigt, für 1 kg Polystyrol nur 2,26 kg. Polystyrol zeigt dabei den großen Vorteil, dass von den 2,26 kg des fossilen Öls ein Anteil von 1,26 kg direkt für die Umwandlung zu Polystyrol genutzt und nur 1 kg zur Energieerzeugung innerhalb des Prozesses verwendet wird. Bei der PHA-Produktion hingegen dienen die 2,39 kg fossilen Öls vollständig der Energieerzeugung.

Obwohl keine weitere Studie im Hinblick auf Ökobilanz und Umweltverträglichkeit von biotechnologisch hergestellten im Vergleich zu rein synthetischen Hochleistungsfasern bekannt ist, gibt es eine Vielzahl an Studien zum Vergleich biotechnologischer und traditioneller chemisch-technischer Prozesse. In Jahr 2001 wurde von der OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) eine Zusammenstellung verschiedenster chemisch-technischer Prozesse veröffentlicht, die durch den Einsatz biotechnologischer Verfahren verbessert wurden. Insgesamt wurden 21 Verfahren vorgestellt, bei denen nachweislich die biotechnologische Produktion der chemisch-technischen vorzuziehen ist. Darunter waren die Produktion von sowohl biologischen Komponenten wie Vitamin B₂, Antibiotika, Enzyme und Aminosäuren, als auch Grundstoffe der chemischen Industrie, wie Acrylamid, Ethanol und Polyester. Die grundlegende Erkenntnis der durchgeführten Studien war, dass der Einsatz von Bio-

technologie ausnahmslos zu umweltfreundlicheren Prozessen geführt hat. Weiterhin zeigte sich, dass für Unternehmen ökonomische und qualitative Aspekte die ausschlaggebenden Kriterien für den Einsatz eines biotechnologischen Verfahrens sind. In Tabelle 2 sind einige auf diesem Gebiet durchgeführte Studien aufgelistet, die für die hier vorgestellte Dissertation von Interesse waren.

Tabelle 2: Relevante Studien und Veröffentlichungen

Veröffentlichung	Titel
UBA-Text 16/2001 ⁴⁰	Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien
UBA-Text 07/2005 ⁴¹	Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren
E. Heinzle et al., 2006 ⁴¹	Bewertung biotechnologischer Prozesse in frühen Phasen der Entwicklung hinsichtlich Risiken bezüglich Ökologie, Sicherheit und Gesundheit
J. F. Jenck et al., 2004 ⁴³	Products and processes for a sustainable chemical industry: a review of achievements and prospects
J. Geibler, D. Hartmann, 2005 ⁴⁴	Soziale Bewertung der Nachhaltigkeit von biotechnologisch hergestellten Produkten

Im UBA-Text 07/2005⁴¹ wurden fünf ausgewählte Verfahren, bei denen jeweils das gleiche Produkt bzw. funktionsanaloge Produkte großtechnisch sowohl chemisch-technisch als auch biotechnologisch hergestellt wurden, gegenübergestellt. Die untersuchten Verfahren waren unter anderem die Herstellung von Vitamin B2, ein Prozessschritt bei der Lederherstellung (Weischen/Äschern) und die Herstellung von Loose-fill-Packmitteln aus Styrol und Stärke. Für die Produktion von Vitamin B2 sind für die kumulierten Werte des Energieaufwands und für den Einzelwert Schwefeldioxid Entlastungen durch Einsatz des biotechnologischen Prozesses zu erwarten, andererseits auch Mehrbelastungen, wie z.B. für das aquatische Eutrophierungspotential. Beim Weischen/Äschern der Lederproduktion führt der Einsatz von Enzymen beim Vergleich mit der Verwendung von herkömmlichen Chemikalien in allen Fällen für die kumulierten Werte der Betrachtung zu einer Umweltentlastung. Bei der Verwendung von Loose-fill-Packmitteln ergeben sich unter Umweltgesichtspunkten eines optimierten Produktlebensweges Vorteile für stärke-basierte Packmittel, jedoch sind diese optimierten Bedingungen nicht immer gegeben, weswegen in der Realität auch styrol-basierte Packmittel vorteilhaft sein können.

Diese drei Beispiele zeigen auf, was in Summe in allen Studien gezeigt wird: jeder biotechnologische Prozess kann individuell entweder eine positive, negative oder auch neutrale Bilanz im Vergleich zu einem herkömmlich chemisch-technischen Prozess aufweisen, weswegen es auf jeden Fall zu empfehlen ist, für jede Anwendung eine separate Betrachtung durchzuführen.

3 MATERIAL UND METHODEN

3.1 Verwendete Materialien

3.1.1 Chemikalien und Spinnenseidenprotein

Chemikalien	Hersteller
Methanol (p.a.)	VWR, Darmstadt, Deutschland
Ethanol (p.a.)	Chemikalien-Ausgabe
Ameisensäure (98 %, p.a.)	Fluka, Buchs, Schweiz
Formaldehyd (37 %)	Merck, Darmstadt, Deutschland
HFIP (1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propanol)	Alfa Aesar, Karlsruhe, Deutschland
Isopropanol (≥ 99,5 %)	Carl Roth, Karlsruhe, Deutschland
Ammoniumsulfat (Ph. Eur)	BDH Prolabo, Darmstadt, Deutschland
Rekombinantes Spinnenseidenprotein eADF4(C16)	Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland
Rekombinantes Spinnenseidenprotein eADF4(C16)	AmSilk, Martinsried, Deutschland
Polycaprolacton (CAPA®6506)	Perstorp AB, Perstorp, Schweden

3.1.2 Sonstige Materialien

Materialien	Hersteller
Aluminiumklebeband Scotch Brand	3M, St. Paul, MN, USA
Wägeschälchen	VWR International, Radnor, PA, USA
Mikroreaktionsgefäß 0,5/1,0/2,0 ml	Eppendorf, Hamburg, Deutschland
Parafilm	Bemis, Neenah, WI, USA
Glasschale	VWR International, Radnor, PA, USA
PA	Beigestellt durch Sandler AG
PET	Beigestellt durch Sandler AG
PP	Beigestellt durch Sandler AG
Metallgewebe	Beigestellt durch Sandler AG

3.1.3 Geräte und Software

Gerät	Modell	Firma
Elektrospinnanlage	Eigenbau Lehrstuhl Biomaterialien	Universität Bayreuth, Bayreuth, Deutschland
Feinwaage	Discovery	Ohaus, Pine Brook, NJ, USA
Heizplatte/Heizrührer	RCT basic	IKA, Staufen, Deutschland
Kamera	Erlangshen ES500W	Gatan, Pleasanton, CA, USA
Kollektorzylinder	Eigenbau	Universität Bayreuth, Deutschland
Luftdurchlässigkeitsprüfgerät	Akustron	Thwing-Albert, West Berlin, NJ, USA
Ökobilanz Modellierungssoftware	Umberto	Ifu-Hamburg GmbH, Deutschland
Ökobilanz-Datenbank	ecoInvent v 2.2	Zentrum für Ökobilanzdaten, ETH Zürich & EPF Lausanne & Paul Scherer Institutes & Schweizer Empa & Schweizer ART
Rasterelektronenmikroskop	LEO 1530	Zeiss, Jena, Deutschland
Rasterelektronenmikroskop	XL 30 ESEM	Philips, Hamburg, Deutschland
Reinstwasseranlage	Q-POD	Millipore (Merck), Darmstadt, Deutschland
Überkopfschüttler	Intelli-Mixer RM-2S	ELMI, Riga, Lettland
Vortexer	VV3S40	VWR International, Radnor, USA
Waage	ALC-3100.2	Acculab, Göttingen, Deutschland

3.1.4 Zusammensetzung der Nährmedien für die Auslegung der Fermentation für die ökobilanzielle Betrachtung

Undefinierte bzw. Vollmedien bestehen aus Extrakten und Mineralsalzbeimischungen. Sie besitzen jedoch den Nachteil, dass das Wachstum und die Produktbildung stark mit der Zusammensetzung und der Qualität der verwendeten Extrakte variieren kann⁶⁰:

LBO – Medium (Lennox) pH 7:

10 g/L Bacto Trypton

5 g/L Hefe Extrakt

5 g/L NaCl

Synthetische oder definierte Medien bestehen nur aus chemischen Einzelkomponenten, Sie enthalten keine Extrakte. Bei der Verwendung von synthetischen Medien ist meist ein etwas langsames Wachstum zu beobachten. Sie besitzen allerdings den Vorteil, dass ihre Zusammensetzung genau bekannt ist und der Verbrauch der Substrate im Medium in der Regel einfach verfolgt werden kann.

Glucose-Mineralsalz-Medium nach Riesenberg (pH 6,7)⁶⁰:

Chemikalien	Batch Medium (pro L)	Zufütterungslösung (pro L)
Glukose (Glyzerin)	25,0 (30,0) g	795,0 (1021,0) g
KH₂PO₄	13,3 g	-
(NH₄)₂HPO₄	4,0 g	-
MgSO₄ x 7H₂O	1,2 g	20,0 g
Zitronensäure	1,7 g	-
EDTA	8,4 mg	13,0 mg
CoCl₂ x 6H₂O	2,5 mg	4,0 mg
MnCl₂ x 4H₂O	15,0 mg	23,5 mg
CuCl₂ x 2H₂O	1,5 mg	2,5 mg
H₃BO₃	3,0 mg	5,0 mg
Na₂MoO₄ x 2H₂O	2,5 mg	4,0 mg
Zn(CH₃COO)₂ x 2H₂O	13,0 mg	16,0 mg
Antischaummittel Breox FTM30	0,1 ml	-

3.2 Verwendete Labormethoden

3.2.1 Herstellung organischer Lösungen für das Elektrosponning

Für das Elektrosponning wurden Lösungen mit dem Spinnenseidenprotein eADF4(C16) und dem Polymer Polycaprolacton mit Hexafluor-2-Propanol (HFIP) hergestellt. Es wurde sowohl selbst hergestelltes eADF4(C16), als auch von AmSilk bezogenes Spinnenseidenprotein verwendet. Zur Herstellung der Spinnlösung wurde gereinigtes Spinnenseidenprotein oder Polymer mit einer Feinwaage auf einem Wägeschälchen abgewogen und in ein 1 ml Mikroreaktionsgefäß überführt. Die erforderliche Menge an HFIP wurde anschließend in das Mikroreak-

tionsgefäß pipettiert und das Gefäß mit Parafilm verschlossen. Das Spinnenseidenprotein/Polymer wurde durch Vortexen für mehrere Minuten, bis die Feststoffe nicht mehr sichtbar waren, gelöst. Anschließend wurde die Lösung im Überkopfschüttler für 24 h rotiert. Die verwendeten Konzentrationen sind als Massenkonzentration (weight per volume: m/v) angegeben. Es wurde maximal 1 ml pro Lösung hergestellt und versponnen, um Lagerungszeiten der Lösung von über 2 Wochen zu vermeiden. Die Lösung wurde bis zur Verarbeitung im Kühlschrank bei 4 °C gelagert.

3.2.2 Elektrospinning

Für die Herstellung der elektrostatisch gesponnenen Vliese wurde eine Apparatur verwendet, welche am Lehrstuhl Biomaterialien geplant und realisiert wurde. Genaue Angaben zum Aufbau der verwendeten Apparatur finden sich in der Dissertation von G. Lang⁷¹.

3.2.3 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung wurde in Anlehnung an Hümmerich et al.⁶² und der Dissertation von G. Lang⁷¹ durchgeführt. In einem zweistündigen Nachbehandlungsschritt wurden die α -helikalen Proteinstrukturen der Spinnenseide mit Isopropanol in eine wasserunlösliche Form umgewandelt, die einen höheren Anteil an β -Faltblatt-Proteinstrukturen aufweist. Dazu wurden die auf das Trägermaterial elektrogewebenen Vliese in einen Rahmen gespannt und in eine Nachbehandlungskammer gestellt. Als Nachbehandlungskammer für den Labormaßstab wurde eine Kunststoffbox verwendet, in die eine Heizplatte hineingestellt werden konnte. Auf die Heizplatte wurde eine Glasschale mit dem Lösungsmittel gestellt. Die Lösung wurde für 240 min auf 60 °C erhitzt. Die Verifizierung der Methode findet sich in der Dissertation von G. Lang⁷¹.

3.2.4 Luftdurchlässigkeitsmessung

Die Luftdurchlässigkeit wurde entsprechend DIN 53887, 53120, ISO 9237, ASTM D737-96 unter Verwendung des Luftdurchlässigkeitsmessgeräts Akustron (Thwing-Albert) bestimmt. Bei der Messung wird die Probe zwischen zwei Membranen geklemmt – die untere Membran wird bei der Durchführung der Messung in Schwingung versetzt und erzeugt eine oszillierende Luftsäule, die obere Membran wird abgeschwächt durch die Probe ebenfalls in Schwingung versetzt. Die durch Induktion ausgelöste Schwingung der unteren Membran wird, mit der bei der oberen Membran ankommenden Schwingung und der daraus resultierenden Induktion verglichen und hieraus wird die Luftdurchlässigkeit berechnet.

Der Messbereich des Geräts reicht von 30 – 3000 l/m²s bei einer Druckdifferenz von 200 Pa. Die Abscheiderate wurde für 30 sec. bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2.350 cm/s und einem Luftstrom von 3.400 m³/h gemessen. Die gemessene Fläche betrug 2 cm x 2 cm.

3.2.5 Rasterelektronenmikroskopie

Bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird, meist im Hochvakuum, mit einem Elektronenstrahl in einem bestimmten Muster über das zu untersuchende Objekt gerastert. Die Wechselwirkungen der Elektronen mit dem Objekt führen mittels Auswertung der Signale zu einer Visualisierung der Oberfläche. Um eine erhöhte Wechselwirkung der Elektronen mit der Oberflächenstruktur zu gewährleisten und eine bessere Darstellung zu erhalten, werden die Proben dünn mit Edelmetalldampf beschichtet (besputtert).

Die Qualität der erzeugten Submikrovliese wurde mittels REM visualisiert. Die Beschichtung der Proben und Erstellung der Aufnahmen erfolgte durch Johannes Diehl und Andreas Schmidt, Lehrstuhl Biomaterialien, Universität Bayreuth. Die Beschichtung der Proben mit Platinplasma mit Schichtdicke von ca. 2 nm wurde mit einem Sputtergerät von Cressington Scientific durchgeführt. Die Proben wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop von Zeiss (LEO 1530) bei einer Spannung von 3 kV untersucht.

3.3 Berechnungsmethoden

Im folgendem sind alle verwendeten Berechnungsmethoden zur Datenerhebung der ökobilanziellen Betrachtung zusammengefasst. Zur besseren Lesbarkeit von Kapitel 5 sind sie dort erneut aufgeführt.

3.3.1 Fermentation

3.3.1.1 Berechnung der Zellmasse bei der Fermentation

Die Zellmasse berechnet sich in der *log*-Phase ^{nach⁸⁴ S31}:

$$X(t) = X_0 \cdot e^{\mu t} \quad \text{Formel 1}$$

X_0 Biotrockenmasse bei Fermentationsstart [g/l]

μ Wachstumsrate [1/h] (bei exponentiellem Wachstum $\mu = \mu_{\max}$)

3.3.1.2 Berechnung der freigesetzten Wärmemenge

Zur Berechnung der benötigten Wärmemenge zur Bildung einer Substanz muss die Masse m der Substanz und ihre entsprechende Standardbildungsenthalpie multipliziert werden⁷⁶:

$$\Delta H_{\text{Wärme, Substanz}} = m_{\text{Substanz}} \cdot \Delta H_{0, \text{Substanz}} \quad \text{Formel 2}$$

$\Delta H_{\text{W\u00e4rme,Substanz}}$	Freigesetzte W\u00e4rme durch Bildung des Substrats [kJ]
m_{Substanz}	Masse an Substrat [kg]
$\Delta H_{0,\text{Substanz}}$	Standardbildungsenthalpie in [kJ/g]

3.3.1.3 Berechnung der Leistungsdichte eines R\u00fchrers in einem Fermenter

Die Leistungsdichte ε eines R\u00fchrers in einem Fermenter kann \u00fcber die Gleichungen des Stoff\u00fcbergangskoeffizienten $k_L a$, die Mortonzahl Mo und des Leistungsparameters Z berechnet werden, indem in Formel 3 die Gleichungen f\u00fcr Mortonzahl und Leistungsparameter eingesetzt werden und nach der Leistungsdichte aufgel\u00f6st wird (Formel 6)^{77 S248ff, S271ff}. Die Mortonzahl ist eine dimensionslose Kennzahl, welche die Relation zwischen Grenzfl\u00e4chenspannung, Dichte der L\u00f6sung, Gravitation und kinematischer Viskosit\u00e4t beschreibt (Formel 4). Der Leistungsparameter ist ebenfalls eine dimensionslose Kennzahl, die den Zusammenhang zwischen Leistungsdichte, Durchmesser des R\u00fchrers zu Durchmesser des Beh\u00e4lters, der Gravitation und der Blasenauftiegs geschwindigkeit beschreibt (Formel 5).

Variablen zum Beschreiben eines Fermenters bei Verwendung eines R\u00fchrbeh\u00e4lters mit normalen Stromst\u00f6rern und Wasser als Medium^{77 S248ff, S271ff}:

$H_{\text{max.Fl\u00fcssigkeitsstand}}$	H\u00f6he max. Fl\u00fcssigkeitsstand in m
D_{innen}	Beh\u00e4lterdurchmesser, innen in m
H/D	H\u00f6he zu Durchmesser verh\u00e4ltnis
V	Arbeitsvolumen in m ³

Variablen zum Beschreiben eines Scheibenr\u00fchrers im Fermenter^{77 S248ff, S271ff}:

$d = 0,32 \cdot D$	Durchmesser des R\u00fchrers [m]
$h = 0,2 \cdot d$	H\u00f6he des R\u00fchrers [m]
$h_B = D/6$	Abstand des R\u00fchrers \u00fcber dem Beh\u00e4lterboden [m]
$Ne_0 = 4,7$	Newtonzahl (wegen \u00c4hnlichkeit der Beh\u00e4lter)
$w_{Be} = 0,23 \text{ m/s}$	Blasenauftiegs geschwindigkeit [m/s]
$C_3 = C_3(Sc) = 1,4 \cdot 10^{-5}$	Konstante
$\nu_f = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosit\u00e4t [m ² /s]
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$\sigma = 0,072 \text{ N/m}$	Grenzfl\u00e4chenspannung [N/m]
$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$	Dichte der L\u00f6sung [kg/m ³]
$k_L a$	Stoff\u00fcbergangskoeffizient [1/s]
ε	Leistungsdichte [W/kg]

Stoffübergangskoeffizient

$$k_L a \cdot \sqrt[3]{\frac{v_f}{g^2}} = C_3 \cdot Mo^{\frac{1}{12}} \cdot Z^2 \quad \text{Formel 3}$$

Mortonzahl

$$Mo = \frac{(\sigma/\rho_f)^3}{g \cdot v_f^4} \quad \text{Formel 4}$$

Leistungsparameter

$$Z = \frac{\varepsilon \cdot d/D}{g \cdot w_{Be}} \quad \text{Formel 5}$$

Leistungsdichte

$$\varepsilon = \frac{g \cdot w_{Be}}{d/D} \cdot \frac{k_L a \cdot \left(\frac{v_f}{g^2}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt[3]{C_3 \cdot \left(\frac{(\sigma/\rho_f)^3}{g \cdot v_f^4}\right)^{\frac{1}{12}}}} \quad \text{Formel 6}$$

3.3.1.4 Leistungsaufnahme von Rührwerken

Die elektrische Leistungsaufnahme von Rührwerken berechnet sich bei konstantem Volumen über die Leistungsdichte, das zu rührende Volumen, die Dichte und einem Faktor 1,3 für den Verlust im Getriebe^{72 S704}. Der Wärmeeintrag Q_R in das zu rührende Volumen berechnet sich ohne den Verlust im Getriebe.

$$P_R = \varepsilon_R \cdot V \cdot \rho \cdot 1,3 \quad \text{Formel 7}$$

$$Q_R = \varepsilon_R \cdot V \cdot \rho \quad \text{Formel 8}$$

P_R	elektrische Leistung des Rührwerks [kWh]
Q_R	Wärmeeintrag durch das Rührwerk [kJ]
$V(t)$	zu verarbeitendes Volumen [m ³]
ε_R	Leistungsdichte des Rührwerks [W/kg]
ρ_L	Dichte der Fermentationslösung 1.050 kg/m ³

Bei Volumenzunahme während des Rührvorgangs (Hauptfermentation) muss der volumenabhängige Strombedarf und Wärmeeintrag über die Rührdauer mit folgenden Formeln berechnet werden:

$$P_R = \varepsilon_R \cdot \rho_L \cdot 1,3 \cdot \int_{t \text{ Anfang}}^{t \text{ Ende}} V(t) dt \quad \text{Formel 9}$$

$$Q_R = \varepsilon_R \cdot \rho_L \cdot \int_{t \text{ Anfang}}^{t \text{ Ende}} V(t) dt \quad \text{Formel 10}$$

3.3.2 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung technischer Geräte berechnet sich nach:

$$E = P \cdot t \quad \text{Formel 11}$$

E	Energiebedarf [Wh]
P	elektrische Leistung des Geräts [W]
t	Einsatzdauer [h]

3.3.3 Filtration

3.3.3.1 Formeln zur Berechnung bei der Diafiltration

Berechnung der Konzentration einer Medienkomponente bei der Diafiltration^{90 S392}:

$$c_{\text{Retentat}} = c_0 \cdot e^{(D \cdot (R-1))} \quad \text{Formel 12}$$

c_{Retentat}	Konzentration der Medienkomponente im Retentat [mol/l]
c_0	Ausgangskonzentration der Medienkomponente [mol/l]
D	Diafiltrationsfaktor [-]
R	spezifisches Rückhaltevermögen der Membran [-]

Berechnung des Rückhalts von Verunreinigungen:

$$R_{\text{Verunreinigung}} = \frac{\ln \frac{c_{\text{Retentat, Verunreinigung}}}{c_{0, \text{Verunreinigung}}}}{D} + 1 \quad \text{Formel 13}$$

Berechnung des Diafiltrationsfaktors:

$$D = \frac{\ln \frac{c_{\text{Retentat, Verunreinigung}}}{c_{0, \text{Verunreinigung}}}}{(R_{\text{Verunreinigung}} - 1)} \quad \text{Formel 14}$$

Berechnung des Diafiltrationsvolumens:

$$V_D = V_0 \cdot D \quad \text{Formel 15}$$

V_D	Diafiltrationsvolumen [l]
V_0	Volumen das filtriert wird [l]

3.3.3.2 Formeln zur Berechnung des Aufkonzentrierens

$$c_{\text{Retentat}} = c_0 \cdot X^R \quad \text{Formel 16}$$

c_{Retentat}	Konzentration der Medienkomponente im Retentat [mol/l]
-----------------------	--

c_0	Ausgangskonzentration der Medienkomponente [mol/l]
X	Aufkonzentrierfaktor [-]
R	spezifisches Rückhaltevermögen der Membran [-]

3.3.3.3 Zielproduktreinheit

$$\text{Zielproduktreinheit} = \frac{R_{\text{Gesamt, Verunreinigung}} \cdot m_{\text{Verunreinigung}}}{R_{\text{Gesamt, Zielprotein}} \cdot m_{\text{Zielprotein}}} \cdot 100\% \quad \text{Formel 17}$$

3.3.3.4 Berechnung von Filterflächen

$$A_{\text{Filter}} = \frac{\dot{V}_{\text{Zulauf}}}{\dot{m}} \quad \text{Formel 18}$$

A_{Filter}	Filterfläche [m ²]
\dot{V}_{Zulauf}	Volumenstrom im Zulauf [l/h]
\dot{m}	Fluxleistung [l/(m ² *h)]

3.3.3.5 Berechnung des Produktverlusts an Filterflächen

$$\Delta m_{\text{Protein}} = A_{\text{Filter}} \cdot \left(\frac{\Delta m}{A} \right)_{\text{Protein}} \quad \text{Formel 19}$$

$\Delta m_{\text{Protein}}$	Masse an Protein [kg]
A_{Filter}	Filterfläche [m ²]
$\left(\frac{\Delta m}{A} \right)_{\text{Protein}}$	Absorption pro Fläche [g/m ²]

3.3.4 Berechnung der notwendigen Substratmasse bei einer Fermentation über die Reaktionsgleichung

Mit Hilfe der Reaktionsgleichung kann mit Formel 20 die Substratmasse bei einer Oxidation berechnet werden:

$$m(\text{Substrat})_{\text{für Energie}} = \frac{m(O_2) \cdot M(\text{Substrat})}{z(O_2) \cdot M(O_2)} \quad \text{Formel 20}$$

$m(\text{Substrat})$	Masse des Substrats [g]
$m(O_2)$	Masse des Sauerstoffs [g]
$M(\text{Substrat})$	Molmasse des Substrats [g/mol]
$M(O_2)$	Molmasse des Sauerstoffs [g/mol]
$z(O_2)$	Anzahl Sauerstoffmoleküle bei der Reaktions

3.3.5 Berechnung der Konzentration über Stoffmenge und Volumen

Mit Formel 22 berechnet sich die Konzentration mit der Stoffmenge und dem Volumen (Grundformel der Chemie):

$$c = \frac{n}{V} \quad \text{Formel 21}$$

c	Konzentration [mol/l]
n	Stoffmenge [mol]
V	Volumen [l]

3.3.6 Leistungsaufnahme bei der Filtration

Der Leistungsbedarf bei der Filtration kann mit dem Druckabfall Δp über das Filtersystem, dem Volumenstrom \dot{V} und der Einsatzdauer Δt abgeschätzt werden^{90 S330}. Δp kann zwischen 1 bis 2 bar angenommen werden (hier 2 bar) und \dot{V} kann als 10xPermeatstrom angenommen werden^{20 S332}:

$$E_{Filtration} = \Delta p \cdot 10 \cdot \dot{V} \cdot \Delta t \quad \text{Formel 22}$$

$E_{Filtration}$	Leistungsbedarf [kWh]
------------------	-----------------------

Zur Berücksichtigung des Wirkungsgradverlusts elektrische Geräte wurde ein Faktor von 1,3 einberechnet^{72 S704}.

$$\dot{Q}_{Filtration} = \frac{E_{Filtration}}{1,3} \quad \text{Formel 23}$$

$\dot{Q}_{Filtration}$	Durch Filtration eingetragenen Wärmemenge [kJ]
------------------------	--

3.3.7 Stromaufnahme von Pumpen

Die elektrische Leistung der Pumpen berechnet sich nach Storhas^{72 S705}:

$$E_P = P_P \cdot t = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot 1,3 \cdot t \quad \text{Formel 24}$$

P_P	elektrische Leistung der Pumpe [kWh]
\dot{V}	Volumenstrom [l/h]
Δp	Druckdifferenz [bar]

Zur Berücksichtigung des Wirkungsgradverlusts elektrische Geräte wurde ein Faktor von 1,3 einberechnet^{72 S704}.

3.3.8 Berechnung des Raumvolumens zum Verdampfen eines Lösungsmittels

Die Menge an Lösungsmittel, die zum Erzeugen eines gewünschten Partialdrucks des Lösungsmittels notwendig ist, berechnet sich mit folgender Formel (und den chemische Grundformeln aus 3.3.12):

$$m_{\text{Lösungsmittel}} = M_{\text{Lösungsmittel}} \cdot \frac{V_{\text{Kammer}}}{V_{m,20^\circ\text{C}}} \cdot \frac{p_{\text{Lösungsmittel}}}{p_o} \quad \text{Formel 25}$$

V_{Kammer}	Raumvolumen zum Verdampfen [m ³]
$m_{\text{Lösungsmittel}}$	Masse des Lösungsmittels [g]
$M_{\text{Lösungsmittel}}$	Molmasse des Lösungsmittels [g/mol]
$V_{m,20^\circ\text{C}}$	Molares Volumen bei Normalbedingungen (20 °C) 22,4 l/mol
p_o	Normaldruck 1.013 mbar
$p_{\text{Lösungsmittel}}$	Partialdruck des Lösungsmittels [mbar]

3.3.9 Berechnung der Wärmemenge

Soll eine Flüssigkeit verdampft werden, muss die Temperatur bis zur Verdampfungstemperatur erwärmt werden und zusätzlich die Verdampfungsenthalpie berücksichtigt werden:

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot (T_{\text{Ende}} - T_{\text{Anfang}}) + \Delta_v H_0 \cdot m \quad \text{Formel 26}$$

ΔQ	Wärmemenge [kJ]
$c_{p,\text{flüssig}}$	spezifische Wärmekapazität $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
m	Masse des zu erwärmenden Stoffes [g]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
$\Delta_v H_0$	Verdampfungsenthalpie [kJ]

Ohne Änderung des Aggregatzustands berechnet sich die notwendige Wärmemenge zum Erwärmen einer Flüssigkeit mit der spezifischen Wärmekapazität der Flüssigkeit, ihrer Masse und der zu überwindenden Temperaturdifferenz⁹¹:

$$\Delta Q = c_{p,\text{flüssig}} \cdot m \cdot (T_{\text{Ende}} - T_{\text{Anfang}}) = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad \text{Formel 27}$$

3.3.10 Wärmedurchgangskoeffizient einer ebenen Wand

Der „U-Wert“ einer ebenen Wand berechnet sich aus dem Kehrwert des Wärmedurchlasswiderstands. Dieser summiert sich aus dem inneren und äußeren Wärmedurchlasswiderstand, sowie den Wärmedurchlasswiderständen der verwendeten Schichten^{92,93}:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad \text{Formel 28}$$

U	„U-Wert“ entspricht dem Wärmedurchgangskoeffizient "k" $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
R _T	Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ für ein ebenes Bauteil aus thermisch homogenen Schichten
R _{si}	innerer Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$
R _i	Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ einer Schicht: $R_i = \frac{d_i}{\lambda_i} ; i = 1$
R _{se}	äußerer Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$
d _i	Dicke einer Schicht im Bauteil [m]
λ _i	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes $[\frac{W}{m \cdot K}]$

3.3.11 Berechnung des Wärmeverlustes über eine Oberfläche

Der Wärmeverlust über eine Oberfläche wird mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten, der Temperaturdifferenz innen zu außen, der Oberfläche und der Dauer des Wärmeverlusts berechnet:

$$Q = k_W \cdot \Delta T \cdot A \cdot \Delta t \quad \text{Formel 29}$$

Q	Wärmeverlust [kWh]
k _W	Wärmedurchgangskoeffizient $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
ΔT	Temperaturdifferenz innen zu außen [K]
A	Oberfläche [m ²]
Δt	Dauer des Wärmeverlusts [t]

3.3.12 Verwendete Chemische Grundformeln

$$m = M \cdot n \quad \text{Formel 30}$$

$$n = \frac{V}{V_m} \quad \text{Formel 31}$$

m	Masse [g]
M	Molmasse [g/mol]
n	Stoffmenge [-]
V	Volumen [l]
V _m	Molares Volumen [l/mol]

3.3.13 Pinch-Analyse

Die Pinch-Analyse ist ein thermodynamisches Analyse- und Auswertungsverfahren zur Optimierung komplexer Systeme zu- und abzuführender Wärmeströme unterschiedlichen Temperaturniveaus. Das Ergebnis der Pinch-Analyse liefert eine Aussage über das thermodynamische Optimum des Systems, d.h. minimal abzuführende und maximal zuzuführende Wärmeleistungen⁹⁴. Sie zeichnet sich durch einen systematischen Ansatz aus, mit dem sich der optimale Energieeinsatz und das beste Anlagendesign bestimmen lassen, indem thermodynamisch minimale Energieverbräuche berechnet werden. Die Methode gibt auch an, wie diese erreicht werden können, indem Wärmetauschernetzwerke zur Wärmerückgewinnung, Energieversorgung und Prozessbedingungen aufeinander abgestimmt werden⁹⁵.

3.4 Ökobilanzielle Betrachtung

Für die vorliegende Arbeit wurde eine ökobilanzielle Betrachtung, eine sogenannte „vereinfachte Ökobilanz“, angefertigt. Die Erstellung erfolgte entsprechend den Richtlinien der ISO 14040 und 14044. Dabei zeichnet sich eine vereinfachte Ökobilanz dadurch aus, dass viele der notwendigen Daten der Sachbilanz aus Mangel realer Daten geschätzt oder berechnet werden^{50 S.45}. Es wurde der Lebensweg der Produktion von Spinnenseide mit der funktionalen Einheit 1 kg abgebildet. Die durchgeführte ökobilanzielle Betrachtung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es wurde ein virtueller Prozess betrachtet, um zu einem frühen Zeitpunkt in der Entwicklung einen Hinweis auf die möglichen Umweltauswirkungen geben zu können. Die simulierte Verwendung der benötigten Rohstoffe ist in Kapitel 6 detailliert beschrieben. Die Datenerhebung wurde nach Vorgaben der ISO 14040 und 14044 durchgeführt, damit die spätere Durchführung eines *Critical Review* möglich ist. Ein *Critical Review* ist die Durchführung eines kritischen Prüfverfahrens durch eine für die Durchführung des Verfahrens zertifizierte Behörde. Ein *Critical Review* wird üblicherweise durchgeführt, wenn die Resultate einer Ökobilanz für werbliche Zwecke verwendet werden sollen – in dem hier vorliegenden Fall, falls AmSilk mit den Ergebnissen einer Ökobilanz werben möchte.

Für die Abbildung der Prozesse und Stoffflüsse, sowie der Durchführung der Wirkungsabschätzung wurde die Ökobilanz-Software Umberto der Ifu-Hamburg GmbH verwendet. Es wurde für die Berücksichtigung der Erzeugung der Rohstoffe die Datenbank ecoInvent v 2.2 verwendet. Zur Wirkungsabschätzung wurden die Auswertung der In- und Outputströme für ausgewählte Wirkungskategorien nach CML2001, sowie für die Wirkungskategorie des Klimawandels nach IPCC2007, für die Wirkungskategorie des Ozonabbaus nach EDIP2003 und

für die Wirkungskategorie der Human- und Ökotoxizität nach USEtox durchgeführt. Des Weiteren wurde der kumulierte Energieaufwand betrachtet.

3.4.1 Wirkungsabschätzung mit CML2001

Die Wirkungsabschätzung wurde mittels des in ecoInvent vorhandenen Bewertungssystems CML2001 nach Guinée et al. 2001a,b^{96,97,98} durchgeführt.

Im ecoInvent-Modul CML 2001 sind folgende Kategorien der Wirkungsabschätzung enthalten; in der Auswertung wird für eine bessere Übersichtlichkeit nur ein Teil der Kategorien betrachtet; diese sind im Folgenden unterstrichen:

- Aquatische Seewasser-Ökotoxizität
MAETP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB
- Aquatische Süßwasser-Ökotoxizität
FAETP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB
- Boden-Ökotoxizität
TAETP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB
- Geruch
Geruch m³ air
- Humantoxizitätspotential
HTP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB
- Ionisierende Strahlung
Ionisierende Strahlung DALYs
- Klimawandel
GWP 20a, 100a, 500a, oberer und untere Nettowert in kg CO₂-Eq
- Landverbrauch
Inanspruchnahme in m²
- Photochemische Ox (Sommersmog)
Sommersmog (Tief-NOx) in kg ethylene
Hoch-NOx POPC in kg ethylene
EBIR in kg formed
MIR in kg formed
MOIR in kg formed
- Ressourcen
Erschöpfung abiotischer Ressourcen kg Antimon (Sb)
- Sedimentäre Seewasser-Ökotoxizität

MSETP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB

- Sedimentäre Süßwasser-Ökotoxizität
FSETP 20a, 100a, 500a und unendlich in kg 1,4-DCB
- Stratosphärischer Ozonabbau
ODP 5a, 10a, 15a, 20a, 25a, 30a, 40a und Gleichgewicht in kg CFC-11-Eq
- Versauerungspotential
Europäischer Durchschnitt in kg SO₂-Eq
Generisch in kg SO₂-Eq
- Überdüngungspotential
Europäischer Durchschnitt in NO_x-Eq
Generisch kg PO₄³⁻-Eq

Für die CML2001-Methode wurden die Daten mit und ohne Langzeitfolgen betrachtet. Bei der Auswertung sind bei Nennung ohne weitere Angabe die CML-Daten mit Langzeitfolgen betrachtet.

3.4.2 Wirkungsabschätzung des Klimawandels mit IPCC2007

Die Wirkungsabschätzung des Klimawandels IPCC2007 liefert drei Werte, von denen nur der Wert für 100 Jahre betrachtet wurde:

- Klimawandel
GWP 20a, 100a und 500a in kg CO₂-Eq

3.4.3 Wirkungsabschätzung des Ozonabbaus mit EDIP2003

Im Wirkungsabschätzungsmodell EDIP2003 in ecoInvent ist die Methode zur Bestimmung des stratosphärischen Ozonabbaus des WMO (World Meteorological Organization, Daniel et al. 2007⁵⁸) enthalten.

- Stratosphärischer Ozonabbau
ODP im Gleichgewicht in kg CFC-11-Eq

3.4.4 Wirkungsabschätzung der Human- und Ökotoxizität mit USEtox

Die USEtox-Methode ist ein Umweltmodell zur Charakterisierung des Einflusses auf den Menschen und die Umwelt in Ökobilanzen und vergleichenden Gefahrenanalysen basierend auf den Beschreibungen von Rosenbaum and Huijbregts et al. 2008⁵⁹ und Hauschild et al. 2009⁵⁶. Es wurde durch ein Forscherteam in der „Task Force on Toxic Impacts under the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative“ entwickelt.

Die Humantoxizität wird in der Einheit CTU_h (comparativ toxic unit for humans) und die Ökotoxizität in der Einheit CTU_e (comparativ toxic unit for ecosystems) angegeben.

- Humantoxizität
 Total, krebserregend und nicht krebserregend in CTU_h
- Ökotoxizität
 Total in CTU_e

Für das USEtox wurden die Daten mit und ohne Langzeitfolgen betrachtet. Bei der Auswertung sind bei Nennung ohne weitere Angabe USEtox-Daten mit Langzeitfolgen betrachtet. Für die Werte der USEtox Humantoxizität wurde nur der Summenwert angegeben.

3.4.5 Kumulierter Energieaufwand

Die kumulierte Energiebedarfsanalyse (Cumulative Energy Requirements Analysis/ CERA) Analyse des kumulierten Energieaufwands (KEA) zielt darauf ab, den Energieverbrauch in dem Lebensweg eines Produkts oder einer Dienstleistung zu untersuchen. Dies beinhaltet direkten wie indirekten oder „grauen“ Verbrauch an Energie aufgrund von Bau- oder Rohmaterialien. Die Methode entwickelte sich in den frühen 1970ern nach der ersten Öl-Krise und hat eine lange Tradition (Boustead & Hancock 1979¹⁰⁰; Pimentel 1973¹⁰¹). Gemäß der VDI Richtlinie 4600¹⁰² bietet die Methode des kumulierten Energieverbrauchs eine wichtige Grundlage, um die Prioritäten bei Betrachtung von möglichen Energieeinsparungen bei Design, Produktion, Gebrauch und Entsorgung von Produkten besser identifizieren zu können.

Der kumulierte Energieaufwand ist eine weitverbreitete Methode, um die größten Einflussfaktoren und die aus ihnen resultierenden Umwelteinflüsse zu identifizieren. Außerdem können die KEA-Werte dazu herangezogen werden, die Ergebnisse einer detaillierten Ökobilanz-Studie mit Ergebnissen von Studien zu vergleichen, bei denen nur der Verbrauch von Primärenergie angegeben wurde. Letztlich können KEA-Werte für Plausibilitätsbetrachtungen herangezogen werden, da aufgrund der KEA-Werte eine einfache Beurteilung, ob grobe Fehler in der Studie vorliegen, möglich ist. Die Betrachtung von KEA-Werten ist nur in Kombination mit anderen Methoden sinnvoll. Die KEA-Werte werden in acht Energiequellen unterteilt:

- erneuerbare Energien, Biomasse
- nicht erneuerbare Energien, Fossil
- erneuerbare Energien, Geothermie
- nicht erneuerbare Energien, Nuklear
- nicht erneuerbare Energien, Primärwald
- erneuerbare Energien, Sonne, umgewandelt

- erneuerbare Energien, potenziell, umgewandelt
- erneuerbare Energien, kinetisch, umgewandelt

In der Auswertung wurden die KEA-Werte summiert verwendet und keine Unterscheidung zwischen den Energiequellen vorgenommen, da als Orientierung bzw. Kennzahl der Energieverbrauch im Gesamten untersucht werden sollte und nicht, welche Energiequelle verwendet wird, v.a. da große Unsicherheiten aus der Wahl der Charakterisierungswerte unterschiedlicher Energiequellen resultieren können¹⁰³.

3.4.6 Für Diskussion ausgewertete Kategorien

Die ausgewerteten Wirkungskategorien nach CML2001 waren:

- Klimawandel 100a in kg CO₂-Eq
- Landverbrauch Inanspruchnahme in m²
- Photochemische Ox (Sommersmog) Tief-NO_x POPC in kg ethylene
- Erschöpfung abiot. Ressourcen kg Antimon (Sb)
- Stratosphärischer Ozonabbau Gleichgewicht in kg CFC-11-Eq
- Versauerungspotential Generisch in kg SO₂-Eq
- Überdüngungspotential Generisch kg PO₄⁻³-Eq

Für die CML2001-Methode wurden bei der hier vorliegenden Dissertation die CML-Daten mit Langzeitfolgen betrachtet.

Weiterführend die weiteren Wirkungskategorien für die Wirkungsabschätzung:

- des Klimawandels nach IPCC2007: 100a in kg CO₂-Eq;
- des stratosphärischen Ozonabbaus des WMO nach EDIP2003⁵⁸: ODP im Gleichgewicht in kg CFC-11-Eq betrachtet.
- der Humantoxizität nach USEtox: Total, krebserregend und nicht krebserregend in CTU_h
- der Ökotoxizität nach USEtox: Total in CTU_e

Für USEtox wurden bei der hier vorliegenden Dissertation die Daten mit Langzeitfolgen betrachtet. Für die Werte der USEtox Humantoxizität wurde nur der Summenwert angegeben.

Zur kumulierten Energiebedarfsanalyse (Cumulative Energy Requirements Analysis/ CERA) wurden die KEA-Werte summiert verwendet, und keine Unterscheidung zwischen den Energiequellen vorgenommen.

3.4.7 Allokationen

Laut der Definition nach der DIN-Norm 14040 ist eine Allokation im Rahmen einer Ökobilanz eine „Zuordnung der Input- oder Outputflüsse eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen“³.

Um demnach normkonform Stoff- und Materialflüsse bei der Erstellung einer ökobilanziellen Betrachtung zu berücksichtigen, werden Allokationen immer dann notwendig, wenn während des Herstellungsprozesses des Zielprodukts sekundäre Stoffflüsse entstehen, für die sich die Möglichkeit einer potenziellen Wieder- oder Weiterbenutzung ergibt. So bezeichnet man die Wiederverwendung, bzw. Rückführung eines Abfallstoffes während der Herstellung des Zielprodukts als „Closed Loop Recycling“ und als Sekundärrohstoff im Bezugssystem der Herstellung des Zielprodukts, die Weiterverwendung eines Abfallstoffs für andere Prozesse, d.h. die Systemgrenze überschreitende Stoffflüsse, als „Open Loop Recycling“.

Dabei können und müssen, sowohl für Closed Loop Recycling als auch für Open Loop Recycling entsprechende Aufwendungen zur Aufbereitung in der ökobilanziellen Betrachtung berücksichtigt und diese nach definierten Regeln der DIN-Norm nach dem Herstellungsprozess des Zielprodukts oder dem Nachfolgeprozess angerechnet werden.

4 ETABLIERUNG VON SPINNENSEIDEN-SUBMIKROFILTERN

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, besteht hohes Interesse an Submikrofiltern für Filterapplikationen.

Als vielversprechendste Anwendung eines Biomaterials in einem Filtermaterial wurde ein Spinnenseiden-Submikrogewebe mit Einsatz als Filtergewebe in einem Staubsauger identifiziert. Für die Erzeugung des Spinnenseiden-Submikrogewebes wurde die Methodik des Elektrosinnings gewählt, da beim elektrostatischen Spinnen, im Vergleich zu anderen Spinnverfahren, sehr dünne Fasern generiert werden können. Im Projektverlauf wurden daraufhin mögliche Trägermaterialien für das Spinnenseiden-Submikrogewebe untersucht (Kapitel 4.1), die Spinnparameter zur Erzeugung eines Spinnenseiden-Submikrogewebes mit Einsatz als Filtergewebe optimiert (Kapitel 4.2) und der Aufbau eines Spinnenseiden-Submikrofilters als Staubbeutel für den Einsatz im Staubsauger entwickelt (Kapitel 4.3).

4.1 Erste Untersuchungen von Trägermaterialien für Filtergewebe

4.1.1 Vergleich von verschiedenen Trägermaterialien für das Elektrosinning

Üblicherweise werden elektrogessponnene Submikrofasern aus Spinnenseidenprotein auf Alufolie, Papier oder Karton abgelegt, um sie, z.B. für Nachbehandlungsschritte, die Analyse und/oder Weiterverwendung für die Zellkultur, gut ablösen zu können. Für Filteranwendung sind sehr dünne Lagen von Submikrofasern notwendig, die dementsprechend fragil sind, deshalb musste untersucht werden, wie sich Spinnenseidenprotein-Submikrogewebe auf verschiedenen Trägermaterialien mittels Elektrosinning ablegen lassen. Das Trägermaterial zeichnet sich dadurch aus, dass es keine Filtereigenschaften aufweist und dadurch keinen, bzw. nur einen sehr geringen Druckverlust erzeugt.

Um ein geeignetes Trägermaterial zu identifizieren wurden verschiedene Materialien mit eADF4(C16) besponnen und hinsichtlich einer gleichmäßigen Belegung untersucht.

Die untersuchten Materialien waren:

- schwarzes Papier als Positivkontrolle
- Polypropylen-Spanbond-Vlies als direkter Vergleich
- Metallgewebe mit 80 µm Maschenweite
- Polyamid-Gewebe mit 80 µm Maschenweite

Es wurde jeweils eine 7,5%ige eADF4(C16)-Lösung in HFIP verwendet und statisch, ohne dass der Kollektor rotierte, auf den Kollektor gesponnen. Es zeigte sich, dass sowohl das Metallgewebe als auch das schwarze Papier am gleichmäßigsten besponnen werden konnte (siehe

Abbildung 10). Beim PP-Vlies bildeten sich neben feinen Fasern viele bis 1 mm große Strukturen. Das PA-Gewebe konnte auch gleichmäßig besponnen werden, es legte sich jedoch nur an Stellen, an denen das Gewebe plan auf dem Kollektor auflag, Submikrogewebe ab. Es kam offensichtlich zu einer Abschirmung der Ladung des Kollektors an den nicht plan aufliegenden Stellen.

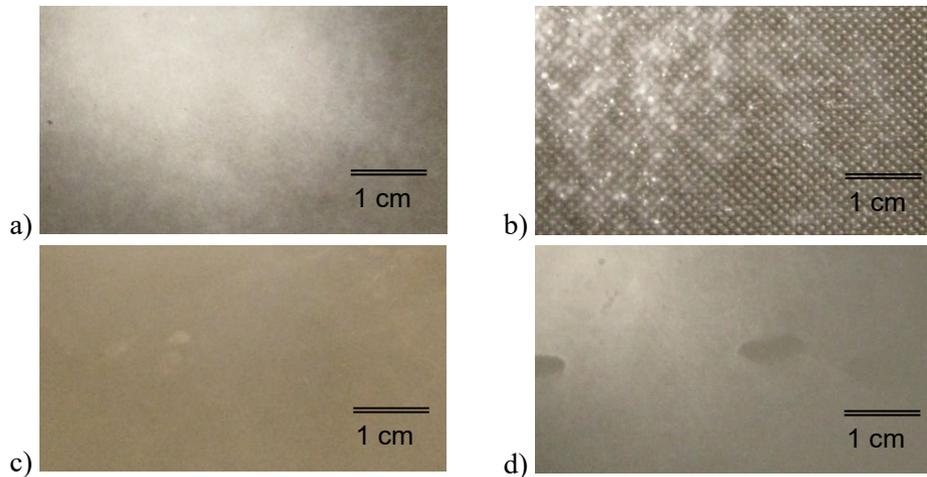


Abbildung 10: Kamera-Aufnahmen vom Elektrosponnen mit 7,5%iger eADF4(C16)-Lösung in HFIP auf verschiedenen Materialien

Vorschub 200 $\mu\text{m}/\text{min}$, Abstand 12 cm, 10-18 kV / 0 kV

- a) Schwarzes Papier
- b) PP-Spanbond-Vlies
- c) Metall-Gewebe
- d) PA-Gewebe

Vergleicht man die auf Metall- und PA-Gewebe abgelegten Submikrofasern in REM-Aufnahmen (Abbildung 11), so zeigten diese, dass sich die Fasern auf dem Metall-Gewebe bevorzugt entlang der Metallfasern ablegten. Bei einem Filter verringert sich dadurch die Filterleistung bezogen auf die Menge der Submikrofasern. Auf dem PA-Gewebe lagen die Submikrofasern dahingegen gleichmäßig über das Gewebe verteilt und könnten so bezogen auf die Menge an Submikrofasern eine bessere Filterleistung erzielen.

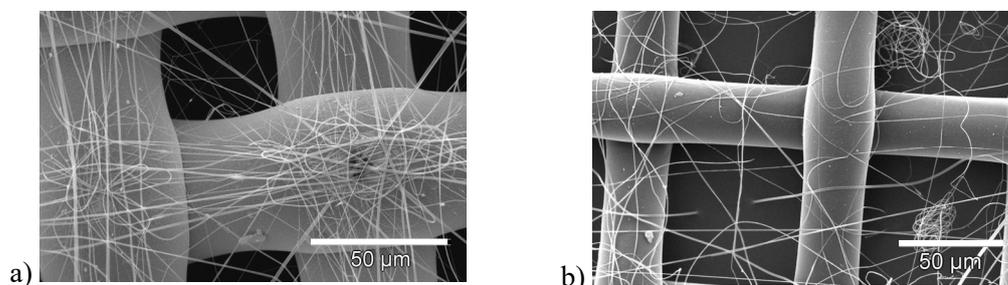


Abbildung 11: REM-Aufnahmen elektrogesponnener Submikrofasern, 7,5%iger eADF4(C16)-Lösung in HFIP

Vorschub 200 $\mu\text{m}/\text{min}$, Abstand 12 cm, 10 – 18 kV / 0 kV

- a) Metall-Gewebe
- b) PA-Gewebe

4.1.2 Untersuchungen zu geeigneten Trägermaterialien für den Einsatz im Staubbeutel

Da die meisten Staubbeutel nach Stand-der-Technik mit Volumenvliesen hergestellt werden, wurde die Möglichkeit untersucht, das Submikrogewebe durch Elektrospinning direkt auf ein Volumenvlies zu spinnen. Dazu wurden die üblicherweise eingesetzten Volumenvliesmaterialien, PET und PP untersucht und mit den Ergebnissen von PA-Gewebe verglichen. Zum Aufbau von Filterbeuteln nach Stand-der-Technik siehe auch 4.3.3.

In Abbildung 12 wurden bei gleichen Bedingungen acht Lagen PA-Gewebe und ein PET-Volumenvlies besponnen. Die mehreren Lagen PA-Gewebe wurden verwendet, um im Vergleich mit dem PET-Volumenvlies eine vergleichbare Gewebeschichtdicke zu erreichen. Es zeigte sich, dass sich die Submikrofasern auf dem PA-Gewebe straffer ablegten.

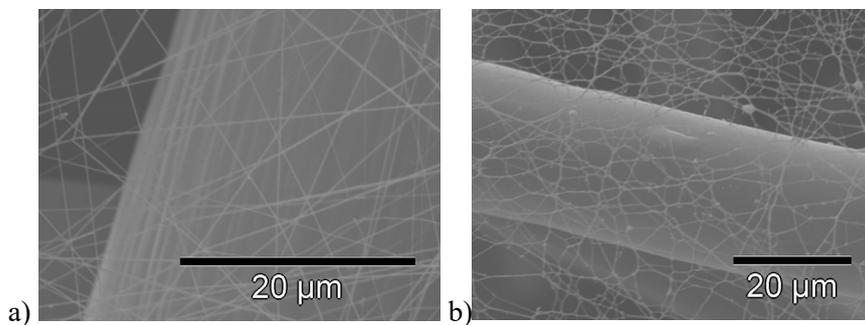


Abbildung 12: Einfluss des Trägermaterials PA vs. PET auf die Faserbildung

3,5% PCL Lösung in HFIP, +25 kV / 0 kV, Abstand 20 cm,

- a) Acht Lagen PA-Gewebe
- b) Volumenvlies PET

In Abbildung 13 ist zu sehen, dass die gleichen Spinnbedingungen bei PP und PET zu einer sehr unterschiedlichen Morphologie der Submikrofasern führen. Bei dem Volumenvlies aus PET waren, bei einer Spannungsdifferenz von 35 kV und 20 cm Abstand, einzelne Fasern zu erkennen, wohingegen beim Volumenvlies aus PP die Fasern stark verklebten und sogar zur Tropfenbildung neigten.

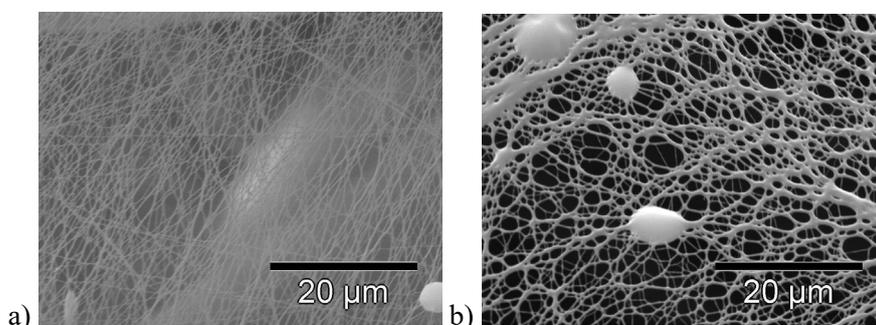


Abbildung 13: Einfluss des Trägermaterials PET vs. PP auf die Faserbildung

3,5% PCL Lösung in HFIP, +30 kV / -5 kV, Abstand 20 cm

- a) Volumenvlies PET
- b) Volumenvlies PP

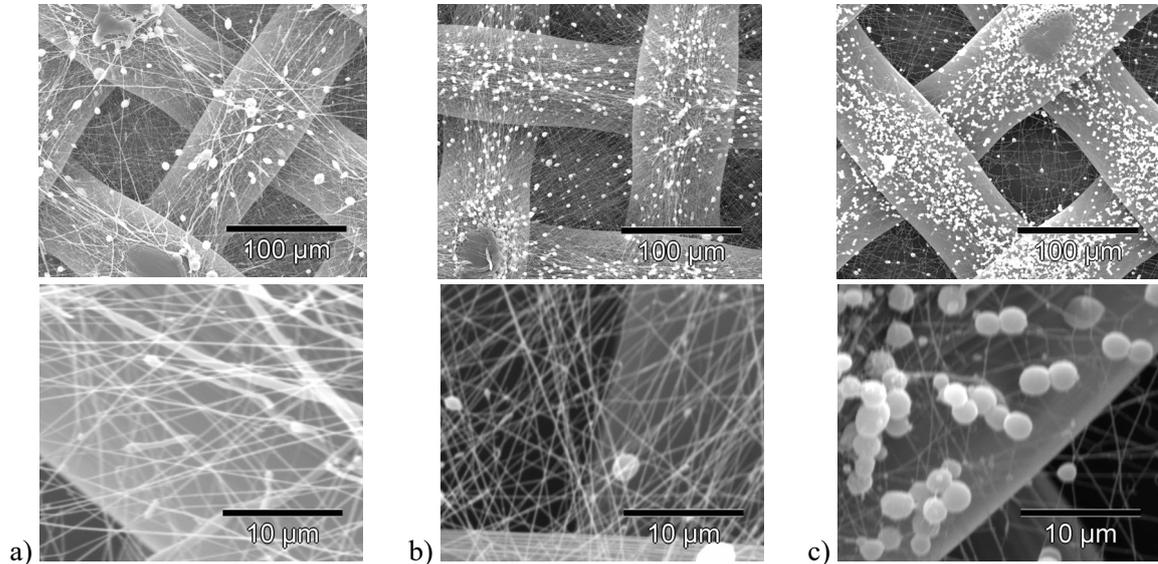
Aus diesen ersten Ergebnissen ergab sich die Notwendigkeit die Spinnparameter für die verschiedenen Materialien gründlicher zu untersuchen, um passende Parameter für jedes Material zu bestimmen.

4.2 Spinnparameter für Elektrosponning auf geeigneten Trägermaterialien

Wie im vorherigen Kapitel 4.1 dargestellt, mussten die Spinnparameter für die möglichen Trägermaterialien PA-Gewebe, PET-Vliesstoff und PP-Vliesstoff einzeln optimiert werden und sind im Folgenden beschrieben.

Da auch die Konzentration der Spinnlösung bei anderen Anwendungen des Elektrosponnings, wie dem Ablegen der Fasern auf Alufolie oder Pappe einen erheblichen Einfluss auf die Fasereigenschaften haben^{105,106,107}, wurden zunächst verschiedene Konzentrationen an PCL und eADF(C16) untersucht, um gleichmäßig geformte Submikrofasern zu erzeugen.

In Abbildung 14 sind REM-Aufnahmen von elektro-gesponnenen Fasern mit Lösungen von PCL und eADF(C16) in unterschiedlicher Konzentration abgebildet. Es zeigte sich, dass im Gegensatz zu Alufolie oder schwarzem Papier mit einem Polyamid-Trägermaterial der Durchmesser durch Änderung der Konzentration der Spinnlösung nicht einstellbar war, sondern nur zur Bildung von Tropfen führte.



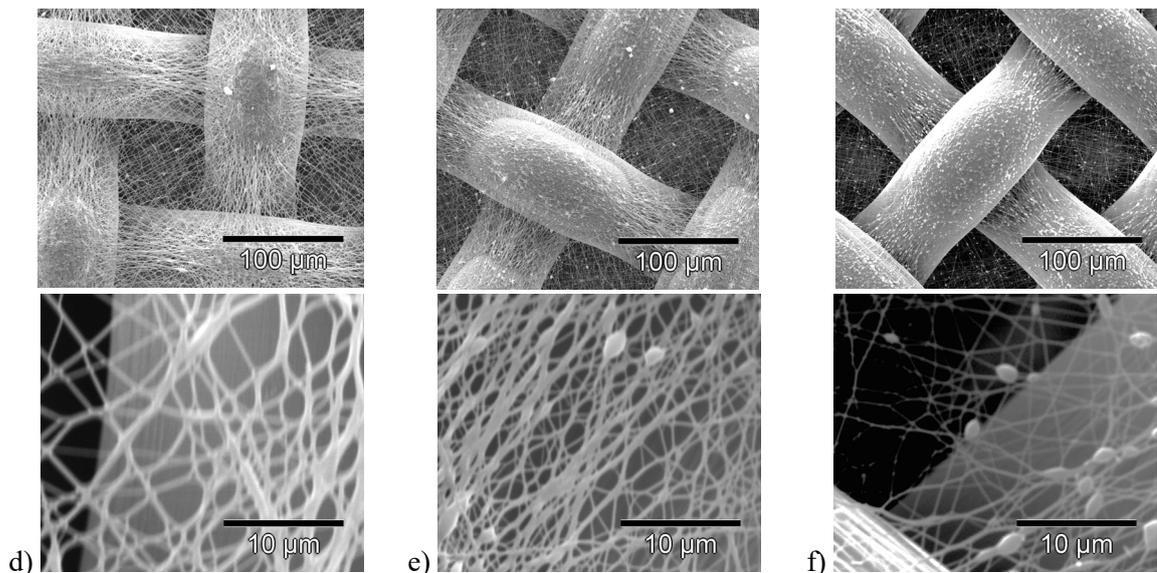


Abbildung 14: REM-Aufnahmen elektrogesponnener Submikrofasern auf PA-Gewebe mit verschiedenen Konzentrationen der Spinnlösung

Vorschub 200 – 250 µm/min, Abstand 12 cm, 10 – 18 kV / 0 kV, Spindauer 10 – 15 min.

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a) 5 %ige PCL-Lösung in HFIP | d) 7,5 %ige eADF(C16)-Lösung in HFIP |
| b) 3,5 %ige PCL-Lösung in HFIP | e) 6 %ige eADF(C16)-Lösung in HFIP |
| c) 2 %ige PCL-Lösung in HFIP | f) 4,5 %ige eADF(C16)-Lösung in HFIP |

Die mit der PCL-Lösung entwickelten Fasern enthielten zu viele Tropfen. Jene mit der eADF(C16)-Lösung entwickelten Fasern wiesen eine gewebeartige Form auf, statt wie favorisiert einzeln aufeinander abgelegter Fasern. In einem nächsten Schritt wurde deswegen zunächst die Herstellung der Spinnlösungen untersucht und optimiert, um dadurch bessere Fasern zu erzielen.

4.2.1 Einfluss von Ammoniumsulfat in der Spinnlösung auf die Qualität der Fasern

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass bei den Proben der eADF(C16)-Lösung weniger Tröpfchen im Submikrofasergewebe enthalten sind. Dies wurde auf den Restgehalt an Ammoniumsulfat in der eADF(C16)-Lösung zurückgeführt, da durch Zugabe von Salzen die Oberflächenspannung der Spinnlösung verändert wird und so die Morphologie von Submikrofasern beeinflusst werden kann¹⁰⁷. Ammoniumsulfat wird bei der Reinigung von Spinnenseidenproteinen verwendet und kann in geringen Spuren im gereinigten Protein enthalten sein. Zur Untersuchung dieser Theorie wurde zu einer 3,5%igen PCL-Lösung kristallines Ammoniumsulfat zugegeben. In Abbildung 15 ist der Einfluss des Ammoniumsulfats auf die Faserstruktur dargestellt. Die geringe Zugabe von Ammoniumsulfat führte zu einer erheblichen Verbesserung der Vliesstruktur. Die Menge des Ammoniumsulfats konnte nicht quantifiziert werden, da sich Ammoniumsulfat nicht in HFIP löst, die zugegebene Menge lag in Form von Salzkristallen, d.h. in kristalliner Form vor.

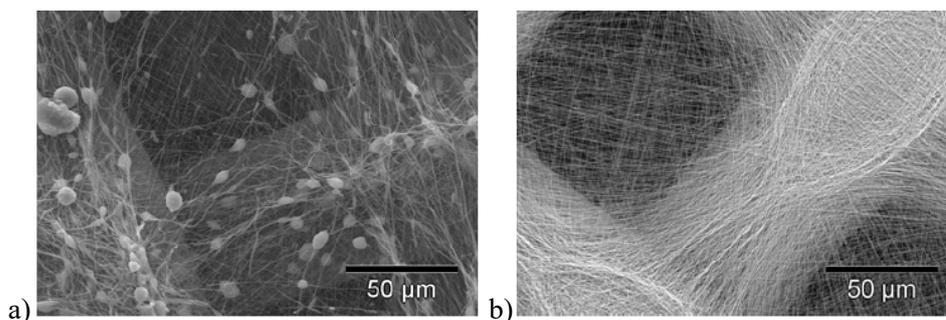


Abbildung 15: REM-Aufnahmen von Submikrofasern aus 3,5%iger PCL-Lösung in HFIP auf PA-Gewebe

Vorschub 200 µm/min, +20 kV / 0 kV, Abstand 12 cm, Spindauer 10 min

- a) ohne Ammoniumsulfat
- b) mit Ammoniumsulfat

Im Weiteren wurde bei den Versuchen zur Optimierung der Spinnparameter auf PA, PP und PET mit einer 3,5%igen PCL-Spinnlösung und einer 6%igen eADF(C16)-Lösung jeweils mit Zugabe von Ammoniumsulfat gearbeitet. Für den Großteil der Untersuchungen wurde PCL verwendet, da parallel zu der Durchführung der Elektro-Spinnversuche die Herstellung der Spinnseidenproduktion durchgeführt wurde und die Menge an reproduzierbar hergestelltem Spinnseidenprotein begrenzt war.

4.2.2 Elektro-Spinnparameter für PA-Gewebe

In Abbildung 16 sind REM-Aufnahmen von Proben mit verschiedener Anzahl an PA-Gewebelagen gegenübergestellt. Die Anzahl an PA-Gewebelagen hatte keinen Einfluss auf die Ausbildung der Submikrofasern. Es zeigte sich, dass Polyamid als Trägergewebe beim Elektrosponnen einen positiven Einfluss auf die Ausbildung von Fasern hatte. Obwohl unterschiedliche Lösungen an eADF(C16), sowie PCL in unterschiedlichen Konzentrationen und unterschiedliche Spinnbedingungen zum Herstellen der Proben verwendet wurden, waren die Fasern sehr gleichmäßig verteilt und homogen.

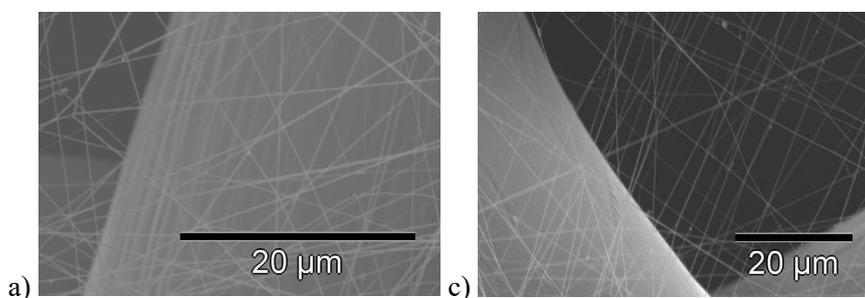


Abbildung 16: REM-Aufnahmen des Vergleichs der Anzahl an Lagen von PA-Gewebe

- a) Acht Lagen PA-Gewebe, 3,5% PCL Lösung in HFIP, Hochspannung +25 kV / 0 kV, Abstand 20 cm, Vorschub 200 µl/min, Spindauer 1 min
- b) 20 Lagen PA-Gewebe, 3,5% PCL Lösung in HFIP, Hochspannung +30 kV / -20 kV, Abstand 20 cm, Vorschub 200 µl/min, Spindauer 1 min

4.2.3 Elektro-Spinnparameter für PET-Volumenvlies

Aus Abbildung 17 wird ersichtlich, dass bei einem Abstand von 12 cm sowohl der Einfluss der Ladung und der Polung der Hochspannungsquelle, welche an der Kanüle, als auch der Ladung und Polung, welche am Kollektor angelegt wurde, sehr gering war. Die Struktur der Submikrofasern änderte sich nur geringfügig bei einer Ladungsdifferenz von 20 kV.

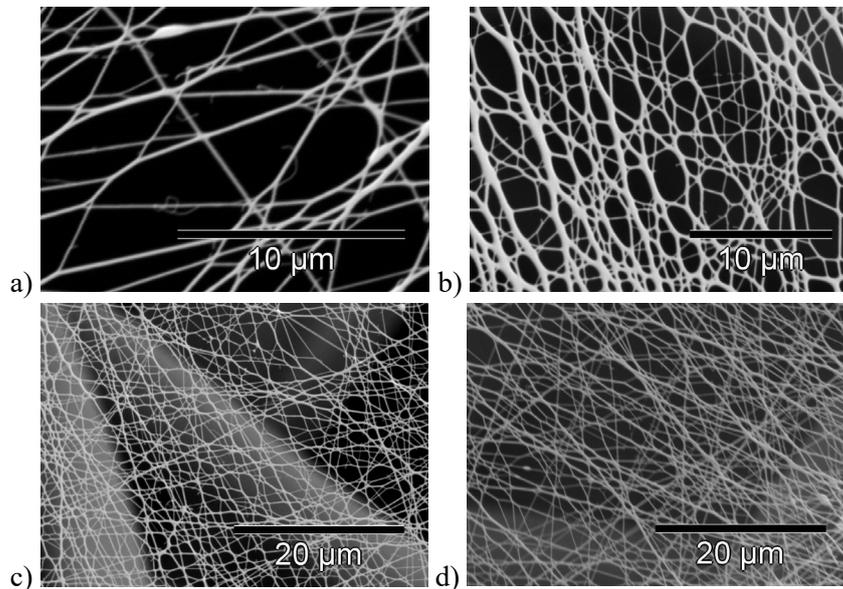


Abbildung 17: REM-Aufnahmen des Einflusses der Polung der Hochspannungsquelle bei PET

Schwarzes Volumenvlies PET, 3,5% PCL Lösung in HFIP, Abstand 12 cm, Polung und Spannung der Hochspannungsquelle an der Kanüle / Polung und Spannung der Hochspannungsquelle am Kollektor

- a) +20 kV / 0 kV
- b) 0 kV / -20 kV
- c) +10 kV / -10 kV
- d) -20 kV / 0 kV

Um bei einem PET-Volumenvlies gut ausgeprägte Submikrofasern zu erzeugen, war eine große Hochspannungsdifferenz von 50 kV notwendig (Abbildung 18).

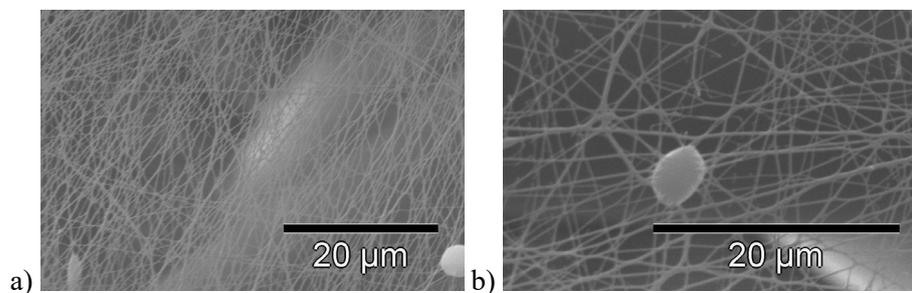


Abbildung 18: REM-Aufnahmen des Einflusses der Hochspannungsdifferenz auf die Fasermorphologie bei PET

Schwarzes Volumenvlies PET, 3,5% PCL Lösung in HFIP, Abstand 20 cm, 1 min

- a) +30 kV / -5 kV
- b) +30 kV / -20 kV

4.2.4 Elektro-Spinnparameter für PP-Volumenvlies

Auf einem PP-Volumenvlies war es auch bei großem Unterschied in der Polung der Hochspannungsquellen nicht möglich, gute Submikrofasern mit PCL zu erzeugen. Mit Spinnseide eADF4(C16) formten sich allerdings bei den gleichen Parametern gut separierte Submikrofasern aus.

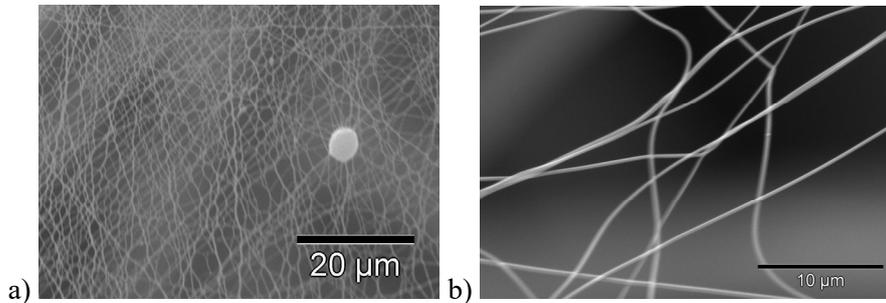


Abbildung 19: Volumenvlies PP, Hochspannung +30 kV / -20 kV

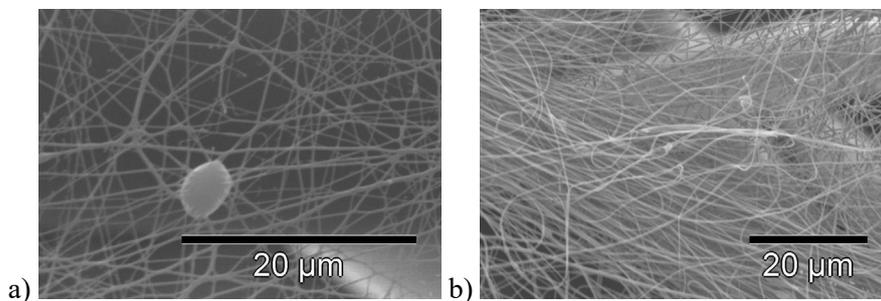
a) 3,5% PCL Lösung in HFIP, Abstand 20 cm, 1 min, 200 µl/min

b) 6% eADF4(C16)-Lösung in HFIP, Abstand 12 cm, 1 min, 130 µl/min

4.2.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Vergleich PCL mit eADF(C16)

In Abbildung 20 sind bei gleichen Spinnbedingungen hergestellte Submikrogewebe aus PCL und eADF(C16) auf verschiedenen Trägermaterialien dargestellt. Bei den Submikrogeweben mit PCL-Lösung auf dem Volumenvlies aus PET und PA-Gewebe sind einzelne Fasern zu erkennen. Auf dem Volumenvlies aus PP sind ebenfalls einzelne Fasern zu erkennen, welche aber zusammenklebten. Es ist anzunehmen, dass durch eine Erhöhung der Hochspannungsdifferenz bessere Fasern erzeugt werden könnten (Begrenzung bei der bestehenden Anlage). Bei eADF(C16)-Submikrogeweben waren auf allen Trägermaterialien einzelne Fasern zu erkennen.



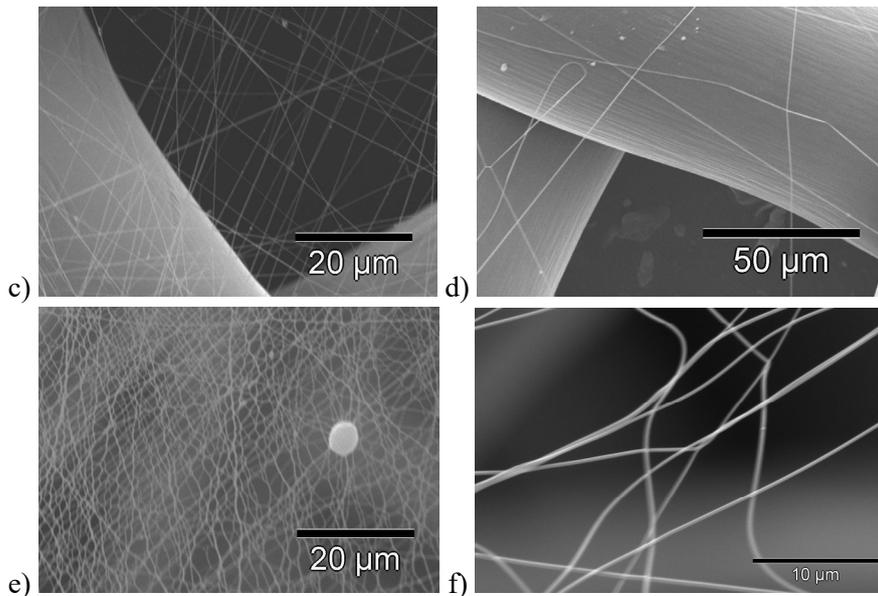


Abbildung 20: Verschiedene Vliese im Vergleich, Hochspannung +30 kV / -20 kV

3,5% PCL Lösung in HFIP

Abstand 20 cm, 1 min, 200 µl/min

a) Volumenvlies PET

c) 20 Lagen PA-Gewebe

e) Volumenvlies PP

6% eADF(C16)-Lösung in HFIP

Abstand 12 cm, 1 min, 130 µl/min

b) Volumenvlies PET

d) 20 Lagen PA-Gewebe

f) Volumenvlies PP

Für gleichmäßige Fasern ist bei Verwendung von PCL eine 3,5%ige Spinnlösung und bei Spinnenseide eine 6%ige Spinnlösung, jeweils mit Zugabe von Ammoniumsulfat, zu empfehlen. Generell ergab sich aus den Versuchen, dass sich Spinnenseide besser verspinnen lässt als PCL und eine geringere Hochspannungsdifferenz notwendig ist, um gute Fasern zu erhalten (siehe Abbildung 19).

Eine mögliche Erklärung dafür, dass sich Spinnenseide besser als PCL verspinnen lässt ist, dass eADF4(C16) im Vergleich zu PCL mehr negative Ladungen aufweist. eADF4(C16) besitzt neben 16 negativ geladene Aminosäuren, deren Carboxylgruppen sich wie eine Säure verhalten und eine positiv geladene Aminosäure, deren Aminogruppe wie eine Base wirkt. In Summe ist das Spinnenseidenmolekül negativ geladen. Polycaprolacton besitzt keine negativ geladenen Bestandteile. Beim Elektrospinnen führt die höhere Anzahl negativer Ladung zu einer besseren Ausprägung der Fasern. Da HFIP als schwache Säure im elektrischen Feld eine Faserbildung begünstigt, wird es aus diesem Grund als Lösungsmittel beim Elektrospinnen verwendet.

Vergleich PA, PET und PP

Es wurden drei verschiedene Polymere hinsichtlich ihrer Bespinnbarkeit durch Elektrospinning untersucht.

Für jedes Trägermaterial und jede Spinnlösung wurden die bestmöglichen Spinnbedingungen ermittelt. Die Morphologie des Materials scheint weniger wichtig zu sein als das Material selbst.

Tabelle 3: Parameter zum Erzeugen von Submikrogeweben auf verschiedenen Trägermaterialien

	PCL, 3,5%		eADF(C16), 6%		Einheit
	Abstand	20	Abstand	12	cm
	Fließgeschw.	200	Fließgeschw.	130	µl/min
Polyamid	Spannung	Δ25	Spannung	Δ20	kV
Polyethylenterephthalat	Spannung	Δ35	Spannung	Δ30	kV
Polypropylen	Spannung	>Δ50	Spannung	Δ50	kV

Von den unterschiedlichen Trägermaterialien ließ sich PA-Gewebe am besten bespinnen. Es ist sowohl aus Kostengründen als auch nach Stand-der-Technik unüblich PA-Volumenvlies für Filtergewebe zu verwenden, weshalb kein PA-Volumenvlies zur Verfügung stand. Eine vergleichbare Schichtdicke wurde simuliert, indem mehrere Lagen PA-Gewebe aufeinandergelegt wurden. Das PET-Volumenvlies ließ sich besser als das PP-Volumenvlies bespinnen. Bei PET legten sich die Submikrofasern schlechter ab und es war eine höhere Hochspannungsdifferenz für die Erzeugung von Submikrofasern notwendig. Bei PP verklebten die Fasern stark und neigten zudem zur Tropfenbildung, die auch bei Erhöhung der Hochspannungsdifferenz, bis zur Grenze der maximal einstellbaren Werte am Gerät, nicht verhindert werden konnten.

Betrachtet man die elektrischen Eigenschaften der drei Materialien (siehe Tabelle 4), so zeigen die Durchschlagfestigkeit und der spezifische Widerstand eine den Versuchen entsprechende Abfolge. Es empfiehlt sich für die Beschichtungen von Geweben für Filteranwendungen diese Materialeigenschaften zu berücksichtigen.

Tabelle 4: Elektrische Eigenschaften der betrachteten Trägermaterialien als Blockmaterial

	Durchschlagfestigkeit kV/mm	Spez. Durchgangswiderstand Ohm*m
Polyamid 6,6¹⁰⁸	15	10 ¹⁰
Polyethylenterephthalat¹⁰⁹	25	>10 ¹⁴
Polypropylen¹¹⁰	50	2 ¹⁴

Für die Belegung von Polyamid mit Submikromaterial wird am wenigsten Energie benötigt. Für eine ressourcenschonende Herstellung ist dieser Aspekt mit den preislichen Faktoren abzuwägen, um dem Verbraucher ein kostengünstiges und leistungsfähiges Produkt zur Verfügung zu stellen.

4.3 Aufbau eines Spinnenseiden-Submikrofilters als Staubbeutel

4.3.1 Herstellung eines Spinnenseiden-Submikrogewebes durch Elektrosponning

Das Spinnenseiden-Gewebe wurde mit einer Elektro-Spinnanlage analog Abbildung 21 hergestellt. Es wurde eine 100 mg/ml Spinnenseidenlösung in HFIP verwendet. Die Spinnlösung wurde in eine Spritze gefüllt, die Kanüle in die Elektrosponn-Anlage eingebaut und an die Hochspannungsquelle angeschlossen. Die Spritze war an einen Schlitten montiert, der sich in Y-Richtung vor und zurückbewegen konnte. Das Trägermaterial wurde um zwei Walzen gespannt, wovon eine der Walzen mit einem Antrieb ausgestattet war und so das Gewebe in X-Richtung bewegt werden konnte. Die Bewegung des Schlittens und die der Walze konnten entsprechend der gewünschten Bespinnungsdauer eingestellt werden. Die Gegenelektrode war ebenfalls mit der Hochspannungsquelle verbunden. Zur Herstellung des Gewebes wurden sowohl die Bewegungsparameter des Schlittens und der Walzen als auch der Vorschub der Spinnlösung und die notwendige Hochspannung eingegeben. Die Submikrofasern legten sich willkürlich auf dem Trägermaterial zu einem Gewebe ab. Der Prozess wurde beendet, wenn die gewünschte Menge an Spinnenseide auf dem Trägermaterial abgelegt worden war. In einem zweistündigen Nachbehandlungsschritt wurden die α -helikalen Proteinstrukturen der Spinnenseide mit Isopropanol in eine wasserunlösliche Form umgewandelt, die mehr β -Faltblatt-Proteinstrukturen aufwies (Abbildung 22). Eine genaue Beschreibung dieser Methode findet sich bei Hümmerich et al.⁶² und der Dissertation von G. Lang⁷¹:

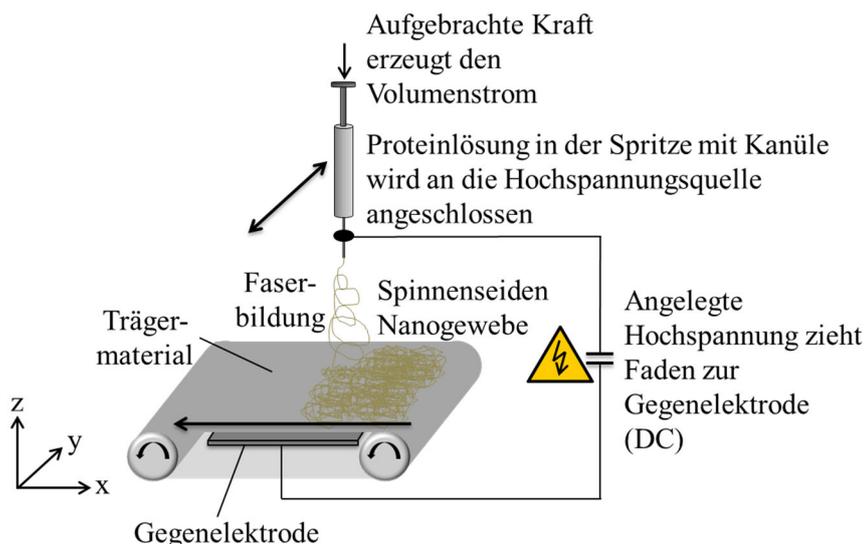


Abbildung 21: Herstellen eines Spinnenseiden-Submikrogewebes durch Elektrosponning

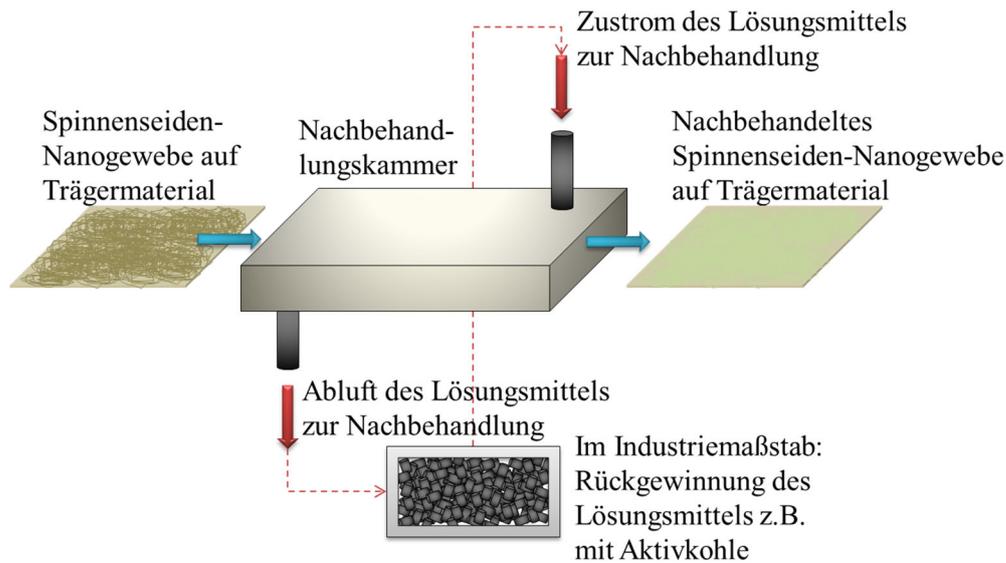


Abbildung 22: Nachbehandlung des Spinnseiden-Submikrogewebes in einer Nachbehandlungskammer

4.3.2 Messung der Luftdurchlässigkeit und Filtereffizienz-Tests

Nach der Herstellung des Spinnseiden-Submikrogewebes wurde die Luftdurchlässigkeit, wie in Abbildung 23, an zehn unterschiedlichen Stellen des Prüfmusters gemessen.

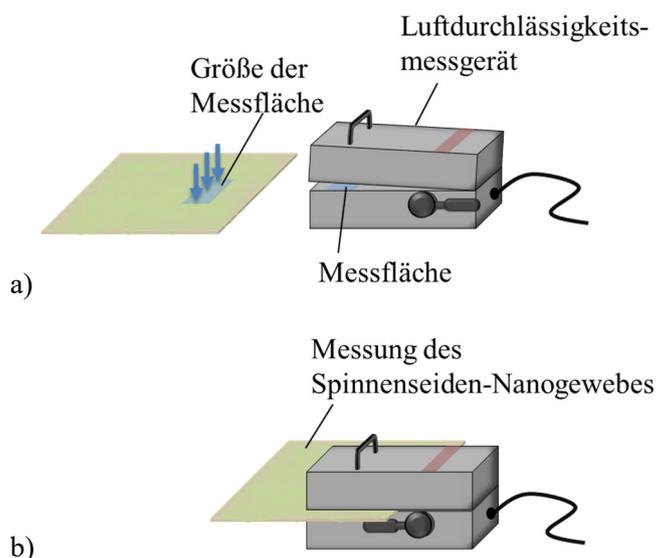


Abbildung 23: Messung der Luftdurchlässigkeit von nachbehandeltem Spinnseiden-Submikrogewebe auf Trägermaterial

- Nachbehandelte Spinnseide und Luftdurchlässigkeitsmessgerät mit dargestelltem Messbereich (2 cm x 5 cm)
- Darstellung der Messung der Luftdurchlässigkeit

War durch die Messung der Luftdurchlässigkeit ein einheitliches Submikrogewebe nachgewiesen, wurde im Anschluss ein Filtereffizienztest durchgeführt. Beim Filtereffizienztest wurde das Testaerosol DEHS (Di-ethyl-hexyl-sebacat), mit dem Partikel mit einem Durch-

messer von 0,3 bis 3 μm erzeugt werden konnten, verwendet¹¹⁰. Bei der Messung wurde der Druck eingestellt, sowie die Partikelgrößen und die Partikelanzahl bestimmt (Universal Particle Sizer). Die Abscheiderate wurde für 30 sec. bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 2.350 cm/s und einem Luftstrom von 3.400 m³/h gemessen. Die gemessene Fläche betrug 2 cm x 5 cm.

4.3.3 Konzeption des Prototyps

Jede Schicht in einem Staubbeutel erfüllt ihren Zweck, wobei die Abfolge der Schichten der Größenordnung der Partikel entspricht, die gefiltert werden sollen. Jede Schicht filtert Partikel in einer gewissen Größenordnung. Ein Staubbeutel nach Stand-der-Technik filtert von innen nach außen. In der ersten Schicht die größten Partikel, in der Größenordnung von Makro- bis Mikropartikel. Für diese Aufgabe werden Vliesstoffe verwendet. Die darauffolgende Schicht filtert hauptsächlich verbleibende Mikropartikel und in geringem Maß Submikropartikel. Für diese Aufgabe wird ein schmelzgesponnenes Vlies verwendet (sog. *Melt-Blown*). Spinnenseiden-Submikrogewebe kann vor allem die kleinsten Partikel – Submikropartikel – filtern, um dadurch den Ausstoß dieser und die evtl. negative Auswirkung für die Anwender zu verringern. Als äußerste Schicht des Staubbeutels wird eine Lage Spunbond-Vliesstoff, der keine Filterleistung aufweist und somit auch nur einen geringen Luftwiderstand, verwendet. In Abbildung 24 ist der schematische Aufbau des Prototypens eines Staubbeutels mit Spinnenseiden-Submikrogewebe dargestellt. Dieser wurde in Zusammenarbeit mit industriellen Kooperationspartnern hergestellt.

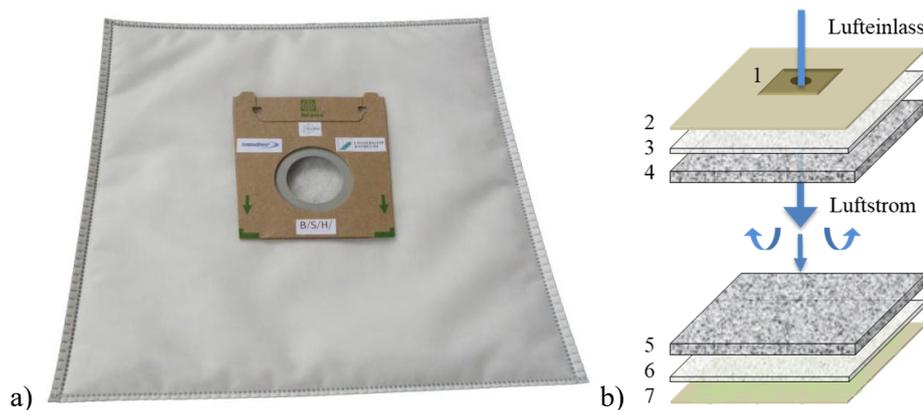


Abbildung 24: Darstellung des Staubbeutels mit Spinnenseiden-Submikrogewebe¹³⁷

- Demonstrationsmodell erstellt mit industriellen Kooperationspartnern
- Schematischer Aufbau des Demonstrationsmodells: 1 = Verbindungsstutzen und Lufteinlass, 2 & 7 = Polyamid-Gewebe mit Spinnenseidenprotein-Submikrogewebe, 3 & 5 = Polypropylen-Spinnvlies, 4 & 5 = Polyester-Stapelvlies

In Abbildung 25 ist zur Veranschaulichung eine REM-Aufnahme eines Spinnenseiden-Submikrogewebes nach dem Filtertest mit dem Norm-Aerosol DEHS abgebildet. Es ist zu

erkennen, dass die Mikro- bis Submikropartikel von den Spinnenseidenfasern zurückgehalten werden konnten.

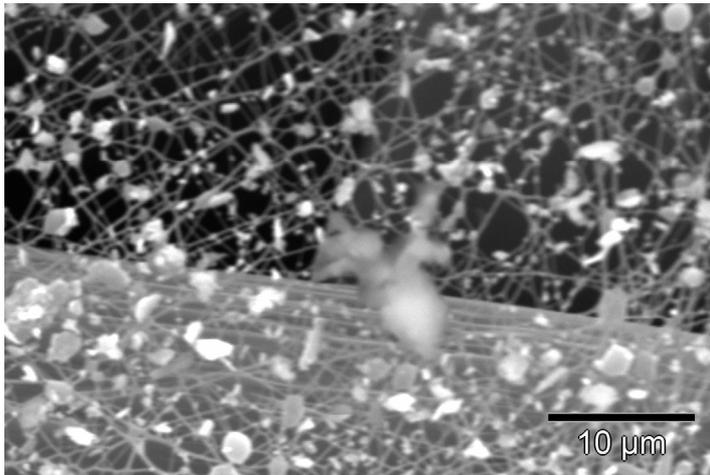


Abbildung 25: REM-Aufnahme eines elektrogenesponnenen Spinnenseiden-Submikrogewebes auf dem Trägermaterial Polyamid (im Hintergrund) nach der Messung mit dem Norm-Aerosol DEHS

Anhand von Messungen, welche nicht Teil dieser Arbeit sind, konnte nachgewiesen werden, dass mit einem geringen Materialaufwand, Submikrovliese mit hohen Abscheideraten hergestellt werden konnten. Diese Ergebnisse wurden von Lang, Jokisch und Scheibel im JoVE (Journal of Visual Experiments) veröffentlicht^{112,71 Kap.3.4.2}.

4.4 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass Spinnenseidenvliese im vergleichbaren Bereich zu anderen submikrofaserigen Materialien nach Stand der Technik filtern. Es zeigte sich zudem, dass sich Spinnenseide einfacher als Polycaprolacton prozessieren ließ, sich also bei gleichen Prozessbedingungen besser Faserstrukturen durch Elektrosponnen erzeugen ließen. Weiterhin wird die Gesundheitsverträglichkeit der Seidensubmikrofasern sehr viel höher, als die von anderen, handelsüblichen Submikrofasern eingeschätzt, da herausgelöste Submikropartikel aus Spinnenseidenprotein im Körper rückstandslos abgebaut werden können. Zur großtechnischen Untersuchung der Filter wurden Flächenfilter erstellt, die Filterleistung von spinnenseidenbasierten Filtern optimiert, und erste Filter-Prototypen konfektioniert. Diese Testfilter wurden bei einem Industriepartner in Staubsaugern getestet.

5 DATENERHEBUNG ZUR BETRACHTUNG DER NACHHALTIGKEIT

Die Betrachtung der Nachhaltigkeit sollte die Möglichkeit einräumen, einzelne Prozessschritte der Herstellung des Spinnenseidenproteins sowie dessen Einsatz als Submikrofilter in einem Staubbeutel zu untersuchen, um darauf basierend den Einfluss auf die Umwelt zu erkennen und die im technischen Rahmen möglichen Optimierungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Am Ende der ökobilanziellen Betrachtung sollte die Lebenszyklen für ein kg Spinnenseide „cradle-to-factory-gate“ – von der Wiege bis zum Werkstor – und in der Anwendung als Spinnenseiden-Submikrogewebe für die Einsatzdauer eines Staubbeutels „cradle-to-grave“ – von der Wiege bis zur Bahre – analysiert werden. Für diese Analysen mussten die Produktionsdaten aller Prozessschritte erhoben werden, um alle Aufwendungen, die für die Erzeugung der Rohstoffe und während des Produkteinsatzes notwendig wären, ermitteln zu können.

Im folgenden Kapitel 5.1 wird zunächst die Datenerhebung für den Herstellungsprozess der Spinnenseide beschrieben und die dafür notwendigen In- und Outputströme berechnet. Anschließend wird in Kapitel 5.2 die Datenerhebung für die Anwendung der Spinnenseide als Submikrogewebe in einem Staubbeutel und dessen Einsatz in einem Staubsauger dargelegt.

5.1 Anlagenauslegung Spinnenseidenprozess

Zum Zeitpunkt der Erstellung der ökobilanziellen Betrachtung befand sich der Herstellungsprozess der Spinnenseidenproteine im Scale-Up vom Labor- zum Produktionsmaßstab. Die Mengen an Spinnenseidenproteinen, die im Labormaßstab produziert werden konnten, reichten für die Produktentwicklung verschiedener Applikationen, jedoch nicht für die Produktion in einem Umfang, wie sie für industrielle Anwendungen notwendig sind. Die ökobilanzielle Betrachtung sollte jedoch für den Produktionsmaßstab erfolgen, um die Herstellungsbedingungen der Spinnenseide so zu berücksichtigen, wie sie sein werden, wenn Spinnenseidenproteine in großen Mengen für diverse Anwendungen produziert werden können. Für die dafür angestrebte Produktionskapazität wurde die Fermentation mit einem Hauptfermenter von 100 m³ und einer anschließenden Reinigung des Spinnenseidenproteins in 5 m³ Batchvolumen angenommen.

Die biotechnologische Produktion von Spinnenseidenprotein erfolgte durch einen gentechnisch modifizierten Mikroorganismus, *Escherichia coli* (*E. coli*), mit einem definierten Nährmedium. Durch die gentechnische Modifizierung wurden die *E. coli*-Bakterien mittels eines Expressionssignals (IPTG) dazu gebracht, künstliches Spinnenseidenprotein zu bilden. Im Labormaßstab betrug die Wachstums- und Produktionsphase 40 Stunden (Hochzelldichte, ohne Anzucht). Im Anschluss wurden die Bakterien mittels Zentrifugation vom Nährmedium

getrennt und anschließend die Zellwände der Bakterien mit einem Hochdruckhomogenisator zerstört. Die abgesetzten Zelltrümmer wurden durch Filtration vom Überstand separiert und mit Natronlauge resuspendiert. Die ungelösten Spinnenseidenproteine wurden durch Filtration von den in Lösung übergegangenene Anteilen der Zelltrümmer isoliert. Verbleibende Rückstände an Verunreinigungen wurden mit Harnstoff gelöst und vom Spinnenseidenprotein durch Filtration getrennt. Anschließend wurde das Spinnenseidenprotein von Salzresten gereinigt, indem es mit technischem Wasser, in diesem Fall entkalktem und entsalztem Wasser, gewaschen und danach in einer Sprühtrocknungsanlage getrocknet wurde. Die Herstellung ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Der Herstellungsprozess basiert auf Daten der Am-Silk GmbH, Martinsried.

Produktreinheit

Für den Einsatz der Spinnenseide als technisches Textilmaterial wurde für die gesamte Produktion die Verwendung von technischem Wasser angenommen. Ebenso wurde aus diesem Grund nur für die Fermenter eine Sterilisation bei 121 °C vorgesehen, um das Wachstum anderer Mikroorganismen zu verhindern. Für die restlichen Geräte wurde eine Reinigung mit 80 °C warmer Lauge als ausreichend angenommen.

Anmerkung: Für einen Einsatz der Spinnenseidenproteine in medizinischen Produkten wäre es notwendig, die Verwendung von hochreinem Wasser (entkalkt, entsalzt, entionisiert) für den gesamten Prozess vorzusehen, sowie für alle Prozessgeräte nach jedem Batchlauf eine Reinigung mit 80 °C warmer Lauge und anschließender Sterilisation bei 121 °C.

Prozessauslegung für die Erstellung der Ökobilanz

Da das Ziel der Prozessauslegung die Modellierung der Ökobilanz war, wurden an einigen Stellen Vereinfachungen getroffen. Für die Modellierung kam es vor allem auf den Verbrauch von Medien und Energie eines durchschnittlich gut laufenden Prozesses an. Diese Vereinfachungen sind bei der Auslegung an den entsprechenden Stellen vermerkt. Zum besseren Verständnis der verschiedenen Schritte und des Equipments der Prozessauslegung, kann auf die Visualisierung in Abbildung 31, Seite 86, zurückgegriffen werden.

5.1.1 Auslegung des Hauptequipments der Produktionsanlage

Basierend auf den Prozessdaten des Labormaßstabs war es notwendig, eine Produktionsanlage zu planen, welche die notwendige Biomasse mit einem 100 m³ Hauptfermenter zur Verfügung stellen kann, sowie entsprechende Vorfermenter zur Anzucht der Biomasse und Behälter zur Bereitstellung der Medien. Dazu wurde basierend auf dem zu dem Zeitpunkt bestehenden Prozess mit einer Ausbeute von 5 g gereinigtem Protein pro Liter Fermentationsmedium ge-

rechnet, um damit die weiteren Hauptgeräte für Ernte und Proteinreinigung auslegen zu können. Die Reinigung des Spinnenseidenproteins wurde batchweise zu 5 m³ geplant. Vorteilhaft dabei war, dass die notwendigen Hauptgeräte zur Proteinreinigung in dieser Größenordnung keine Sonderanfertigungen sein mussten. Es konnte für die Prozessauslegung auf Standardware von branchenüblichen Herstellern zurückgegriffen werden, wodurch alle relevanten Gerätedaten leicht abrufbar waren (Kataloge und Internetauftritt der Hersteller).

Die Abtrennung der festen Bestandteile (Mikroorganismus) von der Fermenterbrühe, die sogenannte Ernte, wurde mit Separatoren vorgesehen. Die Zellen würden zwischen dem Separator und dem Erntebehälter im Kreis gefahren werden. In diesem Arbeitsschritt würden 250 kg Zellen in 3.500 l technisches Wasser überführt werden, wobei das notwendige Gesamtvolumen zum Waschen der Zellen basierend auf analogen Reinigungsmethoden im Labor als 7.000 l angenommen wurde. Vom Erntebehälter aus würden die gewaschenen Zellen durch den Zellaufschluss geführt werden. Die Zellmasse würde mit drei Aufschlusseinheiten in Reihe bei einem Druck von 900 bar aufgeschlossen werden. Die angenommene Aufschlusseffektivität war bei 900 bar über 95% (Laborwerte).

Die Zelltrümmer und das unlösliche Protein würden mittels Filtration von löslichen Proteinen getrennt werden. Die unlösliche Fraktion würde mit technischem Wasser gewaschen, final das Volumen durch Filtration auf 2.500 l reduziert und in den folgenden Behälter überführt werden. Im nächsten Arbeitsschritt würde zur Produktlösung 12,5 l einer 10 M NaOH-Lösung hinzugegeben und dadurch eine Konzentration von 0,05 M NaOH eingestellt werden. Die in der Produktlösung vorliegenden Membranproteine würden durch die Zugabe der Natronlauge gelöst und könnten anschließend vom unlöslichen Zielprotein mittels einer weiteren Filtration abgetrennt werden. Das Lösungsvolumen würde zunächst auf 1.500 l reduziert werden, das unlösliche Protein mit einer Pufferlösung (50 mM Tris/HCl pH 8,0, 100 mM NaCl) gewaschen, final durch Filtration auf 1.000 l Lösungsvolumen reduziert und in den nächsten Behälter überführt werden. In der Lösung würde anschließend Harnstoff bis zu einer Konzentration von 8 M gelöst werden (kontinuierliche Zugabe und Heizen/Halten der Temperatur der Lösung auf 30-40 °C), wodurch das Volumen auf 1.572 l ansteigen würde (Berechnung siehe Anhang L). Die Lösung würde anschließend mit einem Volumen von 8 M Harnstoff diafiltriert, dann der Harnstoff mit technischem Wasser ausgewaschen und final durch Filtration auf ein Volumen von 250 l reduziert werden. Das Protein würde abschließend mit einer Sprühtrocknungsanlage getrocknet werden.

5.1.1.1 Fermentation und Fermenterauslegung

Es wurde eine Startkonzentration für die Fermentation von 0,1 g/l Biotrockenmasse bzw. ein Volumenverhältnis von Inoculum zu Startfermentationsvolumen von 1:10 gewählt^{82 S14}. Dadurch verkürzte sich die Anfangsphase (*lag-Phase*) bis zur Überwindung der kritischen Zellkonzentration und dem Start des exponentiellen Wachstums (*log-Phase*)^{83 S189}.

Bei einer Fermentergröße von 100.000 l mussten drei Vorfermenter mit 10, 100 und 1.000 l eingeplant werden, um zu gewährleisten, dass eine ausreichende Anfangskonzentration an *E. coli*-Bakterien vorliegt. Mit dem 1.000 l Vorfermenter konnten im Batchbetrieb in 9 bis 10 h eine BTM (Biotrockenmasse) von 5,7 bis 9,0 g/l erreicht und damit die Hauptfermentation mit einem Startvolumen von 63.000 l bei einer Start-BTM-Konzentration von 0,1 g/l gestartet werden. Das Startvolumen des Hauptfermenters wurde rechnerisch aus der Zufütterungsrate an Glucoselösung und dem gewünschten Endvolumen nach Formel 1 ermittelt.

Die Zellmasse berechnet sich in der *log-Phase* ^{nach⁸⁴ S31}:

$$X(t) = X_0 \cdot e^{\mu \cdot t} \quad \text{Formel 1}$$

X_0	Biotrockenmasse bei Fermentationsstart [g/l]
μ	Wachstumsrate [1/h] (bei exponentiellem Wachstum $\mu = \mu_{\max}$)

Es ergab sich für die 100.000 l Fermentation das in Abbildung 26 dargestellte Wachstumsprofil mit entsprechender Volumenzunahme durch die Medienzufuhr (berechnet durch die Zugaberate mit einer Glucosekonzentration in der Zugabelösung von 300 g/l). Die angenommenen Wachstumsraten basierten auf den Angaben von AmSilk in Kombination mit der Veröffentlichung von Riesenberg et al. 1991⁷³ und Seeger et al. 1995¹⁸.

Mit den gewählten Parametern ergab sich am Ende der Fermentation eine Biotrockenmassekonzentration von 33,03 g/l. Bei einem berechneten Endvolumen von 101.205 l ergab sich eine Biotrockenmasse von 3.343 kg. Mit einer finalen Proteinausbeute von 5 g/l (AmSilk) berechnete sich die Proteinmenge zu 506,03 kg.

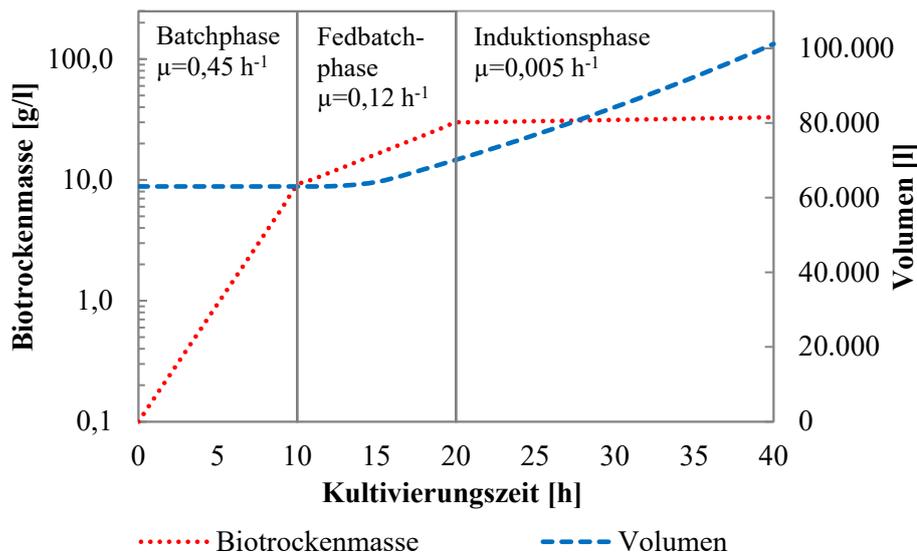


Abbildung 26: Wachstumskurve und Volumenzunahme der Hauptfermentation

Nach unlimitiertem Wachstum in der Batchphase ($\mu_B=0,45 \text{ h}^{-1}$) wurde die Fedbatchphase mit einer spezifischen Wachstumsrate von $\mu_{FB}=0,12 \text{ h}^{-1}$ gestartet. Dadurch wurde gewährleistet, dass während der Fermentation die Bildung von Acetat und Ethanol unter einem wachstumslimitierenden Wert blieb⁷³. Nach ca. 10 h wurde im Anschluss an die Fedbatchphase in der Induktionsphase durch IPTG-Zugabe die Bildung des Spinnenseidenproteins gestartet ($\mu_I=0,005 \text{ h}^{-1}$). Die Temperatur wurde während der Induktion von 37 °C auf 30 °C gesenkt. Die Zufütterung von Glucose wurde mit einer Konzentration von 300 g pro l Zugabemedium angenommen. Daten siehe Anhang A.

5.1.1.2 Wärmeentstehung im Fermenter

Die Wärme, die bei der Fermentation freigesetzt wird, kann mit zwei Herangehensweisen berechnet und dadurch auf Konsistenz geprüft werden. Die Wärmemenge kann einerseits über den Sauerstoffverbrauch, andererseits über entstehende Zellmasse und verbrauchtes Substrat, hier Glucose, berechnet werden.

5.1.1.2.1 Sauerstoffbedarf

Das Profil des spezifischen Sauerstoffverbrauchs für die Herstellung der Spinnenseide konnte von der *E. coli*-Hochzell-dichte-Fermentation von Riesenberg et al. 1991⁷³, anhand der Biotrockenmasse und der Sauerstoffaufnahme rate extrapoliert werden (Abbildung 27, Anhang B). Es ergab sich ein charakteristisches Sauerstoffverbrauchs-Profil, „oxygen uptake rate“ (OUR = Sauerstoffaufnahme rate) zu Biotrockenmasse (BTM). Für die Batchphase betrug OUR/BTM 1 bis 0,4, für die Fedbatchphase 0,12 und für die Induktionsphase 0,09. Das charakteristische Profil ergab sich durch die gesteuerte Glucosezugabe in jeder Phase. Mit diesen Koeffizienten und dem berechneten Wachstumsverlauf der Spinnenseidenprotein-Herstellung konnte der Sauerstoffverbrauch berechnet werden (Abbildung 27). Summiert ergab sich für die 100.000 l -Fermentation ein Sauerstoffbedarf von 7.114 kg , der im Prozess über die Bega-

sung mit Druckluft eingebracht werden würde. Für die Vorfermentationen würden in Summe 7 kg benötigt (Anhang C).

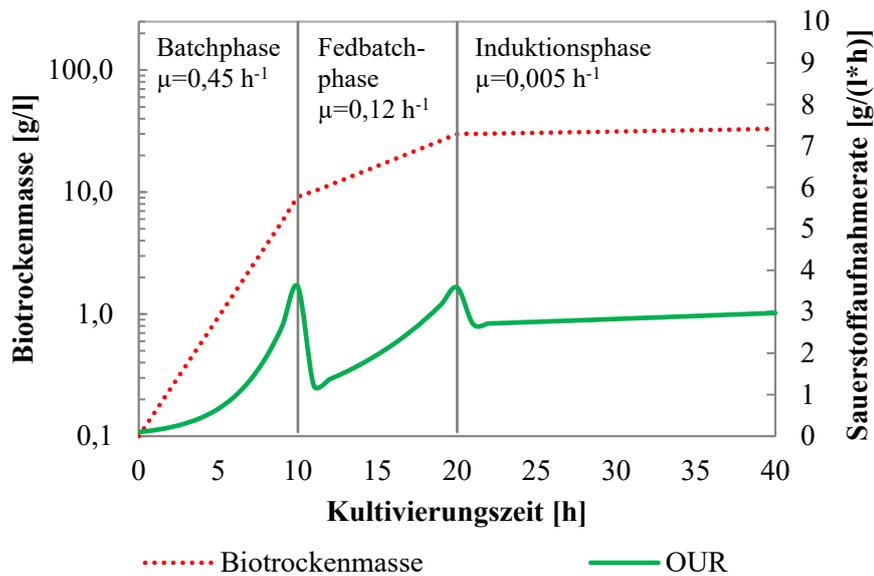


Abbildung 27: Wachstumskurve und Sauerstoffaufnahme der Hauptfermentation
Die Sauerstoffaufnahme (OUR = oxygen uptake rate) wurde anhand der Hochzelldichte-Fermentation von Riesenberg et al. 1991⁷³ mit folgenden Werten extrapoliert: Batch-Phase OUR/BTM = 1 bis 0,4, Fedbatch-Phase OUR/BTM = 0,12 und Induktionsphase OUR/BTM = 0,09. Daten siehe Anhang B.

In Fermentationen mit stark aerobem Wachstum besteht eine Korrelation zwischen der Wärmemenge des Stoffwechsels und dem Sauerstoffverbrauch^{74 S132}. Der Verbrauch von einem mol Sauerstoff setzt 460 kJ frei (14,375 kJ/g O₂)^{74,75}. Daraus resultiert eine Wärmemenge $\Delta H_{\text{Wärme,Sauerstoff}}$ von 102.262,5 MJ.

5.1.1.2.2 Wärme durch Stoffwechsel

Zur Berechnung der Wärmemenge über die entstehende Zellmasse und den Verbrauch an Glucose musste zunächst die benötigte Menge an Glucose berechnet werden. Die Menge Glucose zur Bildung der Biomasse konnte mit dem Ausbeutekoeffizienten $Y_{X/S}$ aus Angaben von AmSilk sowie den Veröffentlichungen von Seeger et al. 1995¹⁸ berechnet werden. Es wurde mit einem Ausbeutekoeffizient für die Batch-Phase von 0,51 g Glucose pro g BTM (Seeger et al.¹⁸) und für die Fedbatchphase von 0,5 g/g (AmSilk) gerechnet. Der Ausbeutekoeffizient für die Induktionsphase musste abgeschätzt werden, da dafür keine Datenquelle zur Verfügung stand. Dieser wurde als 0,32 g/g basierend auf dem Sauerstoffbedarf angenommen.

Um die verbrauchte Menge an Glucose zu berechnen, wurde die in einem Produktionsabschnitt gebildete Zellmasse mit dem entsprechenden Ausbeutekoeffizienten geteilt. Es ergab sich ein Gesamt-Glucoseverbrauch von 11.502,6 kg (Anhang E).

Zur Berechnung über die entstehende Biotrockenmasse und den Verbrauch an Glucose wurde mit der jeweiligen Verbrennungswärme die resultierende Wärmemenge nach Formel 2 berechnet (Verbrennungswärme Biotrockenmasse *E. coli* mit Substrat Glucose = 23,04 kJ/g⁷⁶, Verbrennungswärme Glucose = 15,6 kJ/g⁷⁶).

Zur Berechnung der benötigten Wärmemenge zur Bildung einer Substanz, muss die Masse m der Substanz und ihre entsprechende Standardbildungsenthalpie multipliziert werden⁷⁶:

$$\Delta H_{W\ddot{a}rme,Substanz} = m_{Substanz} \cdot \Delta H_{0,Substanz} \quad \text{Formel 2}$$

$\Delta H_{W\ddot{a}rme,Substanz}$ Freigesetzte Wärme durch Bildung des Substrats [kJ]

$m_{Substanz}$ Masse an Substrat [kg]

$\Delta H_{0,Substanz}$ Standardbildungsenthalpie in [kJ/g]

$$\Delta H_{W\ddot{a}rmemenge,BTM+Glucose} = m_{Glucose} \cdot \Delta H_{0,Glucose} - m_{BTM} \cdot \Delta H_{0,BTM}$$

$$\Delta H_{W\ddot{a}rmemenge,BTM+Glucose} = 11.502,6 \text{ kg} \cdot 15,6 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} - 3.342,81 \text{ kg} \cdot 23,04 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} = 102.422,6 \text{ MJ}$$

Vergleich der berechneten Wärmemengen

Die Berechnung der Wärmemenge über den Sauerstoffverbrauch sowie die Berechnung der Wärmemenge über die gebildete Biomasse und den Glucoseverbrauch wiesen eine hohe Übereinstimmung auf. Die Genauigkeit der Berechnung der Wärmemenge bei der Fermentation wurde deshalb als sehr hoch eingestuft. Für die weitere Betrachtung wurde für die erzeugte Wärmemenge der Mittelwert der beiden Berechnungen von $\Delta H_{W\ddot{a}rme,Stoffwechsel}$ 102.343 MJ herangezogen.

5.1.1.2.3 Berechnung der Rührerleistung

Einerseits wurde die Berechnung der Rührerleistung vorgenommen, um den Stromverbrauch abschätzen zu können, andererseits um die zusätzlich eingebrachte Wärme durch den Rührvorgang zu berechnen. Da der Hauptfermenter eine sehr lange Einsatzdauer hat, wurde eine grobe Abschätzung als eine zu große Fehlerquelle angesehen. Die Rührerleistung wurde über die Geometrie des Behälters und der des Rührers berechnet.

Zunächst musste die zum Rühren des Fermenters benötigte Leistungsdichte ε berechnet werden. Die Viskosität der *E. coli*-Fermenterlösung nahm unter 200 g/l BTM von 1 bis zu 5 mPa*s nicht erheblich zu und war somit niedrigviskos⁷⁸. Das Medium besaß außerdem newtonsche Fluideigenschaften⁷⁹. Zur Abschätzung der Leistungsdichte wurde zur Vereinfachung mit den Werten von Wasser gerechnet. Es wurde zunächst mit einem Stoffübergangs-

koeffizienten in Wasser von 0,2 1/s gerechnet. Die Leistungsdichte berechnete sich mit folgenden Formeln und Berechnungen zu 4,51 W/kg:

Die Leistungsdichte ε eines Rührers in einem Fermenter kann über die Gleichungen des Stoffübergangskoeffizients $k_L a$, die Mortonzahl Mo und des Leistungsparameters Z berechnet werden, indem in Formel 3 die Gleichungen für Mortonzahl und Leistungsparameter eingesetzt werden und nach der Leistungsdichte aufgelöst wird (Formel 6)^{77 S248ff, S271ff}. Die Mortonzahl ist eine dimensionslose Kennzahl, welche die Relation zwischen Grenzflächenspannung, Dichte der Lösung, Gravitation und kinematischer Viskosität beschreibt (Formel 4). Der Leistungsparameter ist ebenfalls eine dimensionslose Kennzahl, die den Zusammenhang zwischen Leistungsdichte, Durchmesser des Rührers zu Durchmesser des Behälters, der Gravitation und der Blasenauftiegs geschwindigkeit beschreibt (Formel 5).

In Folgendem sind die Variablen zum Beschreiben eines Fermenters bei Verwendung eines Rührbehälters mit normalen Stromstörern und Wasser als Medium aufgeführt^{77S248ff, S271ff}:

$H_{max.Flüssigkeitsstand}$	Höhe max. Flüssigkeitsstand in m
D_{innen}	Behälterdurchmesser, innen in m
H/D	Höhe zu Durchmesser verhältnis
V	Arbeitsvolumen in m ³

Variablen zum Beschreiben eines Scheibenrührers im Fermenter^{77 S248ff, S271ff}:

$d = 0,32 \cdot D$	Durchmesser des Rührers [m]
$h = 0,2 \cdot d$	Höhe des Rührers [m]
$h_B = D/6$	Abstand des Rührers über dem Behälterboden [m]
$Ne_0 = 4,7$	Newtonzahl (wegen Ähnlichkeit der Behälter)
$w_{Be} = 0,23 \text{ m/s}$	Blasenauftiegs geschwindigkeit [m/s]
$C_3 = C_3(Sc) = const. = 1,4 \cdot 10^{-5}$	Konstante
$\nu_f = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität [m ² /s]
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung [m/s ²]
$\sigma = 0,072 \text{ N/m}$	Grenzflächenspannung [N/m]
$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$	Dichte der Lösung [kg/m ³]
$k_L a$	Stoffübergangskoeffizient [1/s]
ε	Leistungsdichte [W/kg]

Stoffübergangskoeffizient

$$k_L a \cdot \sqrt[3]{\frac{\nu_f}{g^2}} = C_3 \cdot Mo^{\frac{1}{12}} \cdot Z^2$$

Formel 3

Mortonzahl

$$M_o = \frac{(\sigma/\rho_f)^3}{g \cdot v_f^4} \quad \text{Formel 4}$$

Leistungsparameter

$$Z = \frac{\varepsilon \cdot d/D}{g \cdot w_{Be}} \quad \text{Formel 5}$$

Leistungsdichte

$$\varepsilon = \frac{g \cdot w_{Be}}{d/D} \cdot \frac{k_L a \cdot \left(\frac{v_f}{g^2}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{C_3 \cdot \left(\frac{(\sigma/\rho_f)^3}{g \cdot v_f^4}\right)^{\frac{1}{12}}}} \quad \text{Formel 6}$$

Die elektrische Leistungsaufnahme von Rührwerken berechnet sich bei konstantem Volumen über die Leistungsdichte, das zu rührende Volumen, die Dichte und einem Faktor 1,3 für den Verlust im Getriebe nach Formel 7. Zur Berücksichtigung des Wirkungsgradverlusts elektrische Geräte wurde ein Faktor von 1,3 einberechnet^{72 S704}. Der Wärmeeintrag Q_R in das zu rührende Volumen berechnet sich ohne den Verlust im Getriebe nach Formel 8.

$$P_R = \varepsilon_R \cdot V \cdot \rho \cdot 1,3 \quad \text{Formel 7}$$

$$Q_R = \varepsilon_R \cdot V \cdot \rho \quad \text{Formel 8}$$

P_R	elektrische Leistung des Rührwerks [kWh]
Q_R	Wärmeeintrag durch das Rührwerk [kJ]
$V(t)$	zu verarbeitendes Volumen [m ³]
ε_R	Leistungsdichte des Rührwerks [W/kg]
ρ_L	Dichte der Fermentationslösung 1.050 kg/m ³

Bei Volumenzunahme während des Rührvorgangs (Hauptfermentation) muss der volumenabhängige Strombedarf (Formel 9) und Wärmeeintrag (Formel 10) über die Rührdauer berechnet werden:

$$P_R = \varepsilon_R \cdot \rho_L \cdot 1,3 \cdot \int_{t \text{ Anfang}}^{t \text{ Ende}} V(t) dt \quad \text{Formel 9}$$

$$Q_R = \varepsilon_R \cdot \rho_L \cdot \int_{t \text{ Anfang}}^{t \text{ Ende}} V(t) dt \quad \text{Formel 10}$$

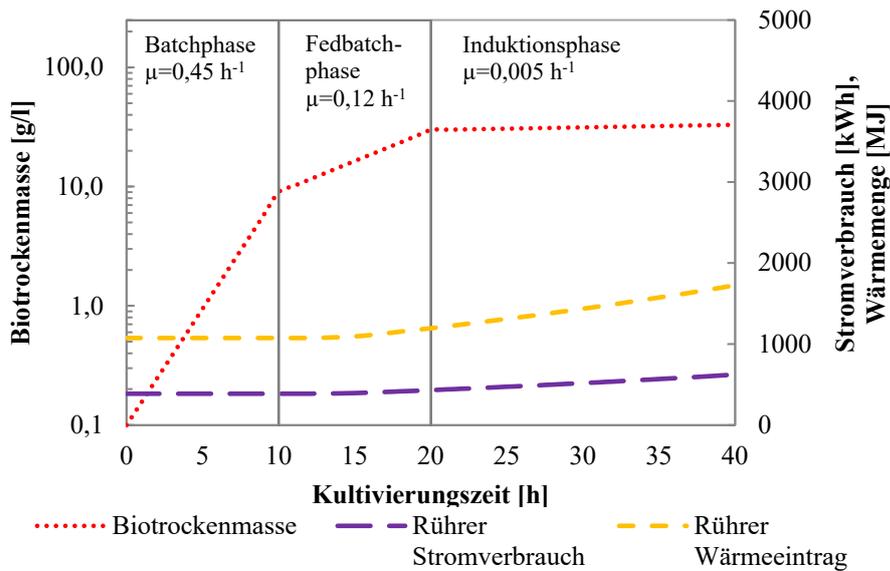


Abbildung 28: Wachstumskurve, Stromverbrauch und eingebrachte Wärmemenge der Hauptfermentation

Die Darstellung der Tabellenwerte von Abbildung 28 befindet sich in Anhang F, eine Überprüfung der technischen Machbarkeit der Parameter in Anhang G. Bei der 100.000 l Fermentation wurde die durch den Rührvorgang freigesetzt Wärmemenge nach Formel 10 zu 52.156 MJ berechnet (Volumenzunahme berücksichtigt, Dichte der Fermentationslösung 1.050 kg/m³).

5.1.1.3 Separator

Die Zellen sollten am Ende der Fermentation entsprechend der Proteinreinigungskapazität im Batchvolumen von 5 m³ verarbeitet werden. Um die Zellen vom Medium zu trennen, wurde die Verwendung eines Separators angenommen. Der Separator CSE 170 von Westfalia mit einer Flussrate von 3.000 l/h^{88,89} benötigte für 8.500 l Volumen (Medienrückstände + Wasser zum Waschen der Zellen) 2,83 h mit einer max. Anschlussleistung von 45 kW. Der Energiebedarf berechnete sich für diesen Separatortyp nach Formel 11. Da die Anschlussleistung ein Maximalwert ist, wurde dieser Wert mit 0,7 multipliziert, um den tatsächlichen Energiebedarf abzuschätzen¹¹⁵:

$$E = P \cdot t \tag{Formel 11}$$

- E Energiebedarf [Wh]
- P elektrische Leistung des Geräts [W]
- t Einsatzdauer [h]

$$E_{\text{Separatoren CSE 170}} = 45 \text{ kW} \cdot 2,83 \text{ h} \cdot 0,7 = 89,1 \text{ kWh}$$

Für die Berechnung des Produktverlusts wurde für die Abtrennung der Zellen nach der Fermentation eine Ausbeute von 98% angenommen^{86,87}. Das Volumen nach der Ernte betrug 3.500 l.

5.1.1.4 Zellaufschluss

Der Zellaufschluss wurde bei 900 bar im Hochdruckhomogenisator durchgeführt (AmSilk). Zur Durchführung im 5 m³ Batchvolumen wurde der Hochdruckhomogenisator der Firma GEA Niro Soavi der Baureihe Ariete Typ NS3110 ausgewählt. Die absorbierte Motorleistung würde bei diesem Gerät maximal 110 kW bei 1.500 bar betragen, weshalb hier bei einer linearen Abhängigkeit der absorbierten Motorleistung vom eingestellten Druck von 900 bar mit 66 kW Stromverbrauch gerechnet wurde. Bei 900 bar könnte das Gerät mit einem Durchsatz von 3.400 l pro Stunde arbeiten und bräuchte somit zum Verarbeiten von 3.500 l Zellsuspension knapp 1 h. Es wurde eine Aufschlusseffektivität von 95% angenommen (AmSilk).

5.1.1.5 Filtration

Die Filtration des Produktstroms sollte als Querstrommikrofiltration durchgeführt werden^{90S 390}. Um das Zielprotein zurückzuhalten und Verunreinigungen durchzulassen, wurde eine Porengröße der Filtermembran von 100 nm angenommen.

Zur Beschreibung von Transportprozessen durch Membranen existieren komplexe Formeln, welche die Art der Strömung (laminar oder turbulent), die Gelschichtbildung (Konzentrationspolarisation) und die Adsorption von Proteinen an der Membran (Membranfouling) berücksichtigen⁹⁰. Jedoch lassen sich im Normalfall bei realen Filtrationsanwendungen diese Einflüsse bei der Trennung von Proteingemischen nicht vorhersagen und quantifizieren. Rekombinante Spinnenseide wird im Übermaß exprimiert (starker Promoter, hohes Expressionssignal), wodurch die *E. coli*-Bakterien nicht zu einer korrekten Faltung des Proteins imstande sind und sich Proteinaggregate bilden¹¹⁴. Dadurch unterscheidet sich das Zielprotein in Größe und Form nicht mehr wesentlich von anderen durch Überexpression produzierten Proteinen, und es konnte von in der Literatur berichteten Reinigungsstrategien auf die hier vorliegende Fragestellung geschlossen werden.

Die Poren der Filtermembran können sich bei der Mikrofiltration leicht mit Zelltrümmern und/oder Zielprotein zusetzen, deshalb war die Berücksichtigung einer Betriebsweise mit konstantem Flux (und dadurch ansteigendem Transmembrandruck) und regelmäßigen Rückspülphasen notwendig^{90S 550}. Eine kontinuierliche Diafiltration ist meist einer nicht-kontinuierlichen Diafiltration vorzuziehen, da bei einer kontinuierlichen Diafiltration das Diafiltrationsvolumen zum Erreichen der gleichen Klärungsleistung geringer ist^{90 S393}. Durch das

geringere Filtrationsvolumen sinken die Prozesszeit und der Produktverlust. Durch eine kontrollierte Prozessführung (variieren des Drucks der Permeatseite, durch eine separate Kreislaufpumpe für den Permeatstrom) kann der Transmembrandruck auf konstantem Niveau gehalten und ein besseres Filtrationsergebnis erzielt werden^{91 S301ff}. Das Membranfouling wird durch diese Maßnahme ebenfalls reduziert, was die Standzeit erhöht und die Reinigung der Membran erleichtert. Die Filtermembran muss für diese Art der Prozessführung einem Gegendruck von 5 bar standhalten können, weswegen keine Spiralwickel- oder Hohlfasermodule für die Klärung nach Zellaufschluss und nach der NaOH-Behandlung geeignet waren – der hohe Feststoffanteil kann zu einer Verstopfung der engen Zwischenräume und Fasern führen^{90 S549}. Für die Filtration zur Reinigung der Spinnenseide wurde ein Keramikfilter angenommen. Bei Lee et al. 2004¹¹⁸ wurde zur Filtration nach dem Zellaufschluss ein Keramikfilter verwendet (Membralox 0,2 µm), der 91% der löslichen Proteine entfernt. Es trat nahezu kein Verlust an überexprimierten Proteinaggregaten auf.

Folgende Formeln wurden zur Berechnung der Filtration herangezogen:

Berechnung der Konzentration einer Medienkomponente bei der Diafiltration^{90 S392}:

$$c_{Retentat} = c_0 \cdot e^{(D \cdot (R-1))} \tag{Formel 12}$$

- $c_{Retentat}$ Konzentration der Medienkomponente im Retentat [mol/l]
- c_0 Ausgangskonzentration der Medienkomponente [mol/l]
- D Diafiltrationsfaktor [-]
- R spezifisches Rückhaltevermögen der Membran [-]

Berechnung des Rückhalts von Verunreinigungen:

$$R_{Verunreinigung} = \frac{\ln \frac{c_{Retentat, Verunreinigung}}{c_{0, Verunreinigung}}}{D} + 1 \tag{Formel 13}$$

Berechnung des Diafiltrationsfaktors:

$$D = \frac{\ln \frac{c_{Retentat, Verunreinigung}}{c_{0, Verunreinigung}}}{(R_{Verunreinigung} - 1)} \tag{Formel 14}$$

Berechnung des Diafiltrationsvolumens:

$$V_D = V_0 \cdot D \tag{Formel 15}$$

- V_D Diafiltrationsvolumen [l]
- V_0 Volumen das filtriert wird [l]

Berechnung des Aufkonzentrierens

$$c_{Retentat} = c_0 \cdot X^R \tag{Formel 16}$$

Zielproduktreinheit

$$\text{Zielproduktreinheit} = \frac{R_{\text{Gesamt, Verunreinigung}} \cdot m_{\text{Verunreinigung}}}{R_{\text{Gesamt, Zielprotein}} \cdot m_{\text{Zielprotein}}} \cdot 100\% \quad \text{Formel 17}$$

Berechnung von Filterflächen

$$A_{\text{Filter}} = \frac{\dot{V}_{\text{Zulauf}}}{\dot{m}} \quad \text{Formel 18}$$

A_{Filter}	Filterfläche [m ²]
\dot{V}_{Zulauf}	Volumenstrom im Zulauf [l/h]
\dot{m}	Fluxleistung [l/(m ² *h)]

Bei der 1. Filtration war das Ziel, die durch den Zellaufschluss frei gewordenen löslichen *E. coli*-Proteine abzutrennen. Bei Ishihama et al. 2008¹²⁴ findet sich eine Auflistung aller bei *E. coli* vorkommender Proteine, deren Molekülgröße und ihrer Lokalisation in der Zelle. Es findet sich kein Molekül größer 200 kDa. Die Auflistung berücksichtigt jedoch keine funktionalen Komplexe, wie z.B. Ribosomen. Bei Lee et al. 2004¹¹⁸ (Filtration mit Keramikfilter) konnte mit drei Diafiltrationsvolumina nur 91% der löslichen Proteine entfernt werden. Darauf basierend wurde für die Reinigung der Spinnenseide ein Rückhalt der Verunreinigungen von 19,7% berechnet (Formel 13), d.h. dass Proteine mit der Membran wechselwirkten und/oder größere Komplexe diese nicht passieren konnten. Der Rückhalt an Zielprotein wurde für die Berechnung auf 99,5% festgelegt. Für eine Ausbeutebetrachtung wurde dieser Wert separat variiert (siehe auch Kapitel 5.1.1.5.1 und 5.1.1.5.2). Die finale Menge an Verunreinigung im Zielprodukt wurde auf 0,0003% festgelegt (Vorgabe AmSilk). Die Zielproduktreinheit berechnete sich mit Formel 17 aus der Menge der Verunreinigung im Verhältnis zur Ausbeute an Zielprotein. Die Gesamt-Ausbeute an Zielprotein und der Gesamt-Restgehalt an Verunreinigungen berechneten sich durch die Multiplikation der jeweiligen Rückhaltungswerte aller Filtrationsschritte. Die Menge an Verunreinigungen wurde mit den Werten der Fermentation quantifiziert. Ausgangsbasis war hierfür die Biotrockenmassenkonzentration von 33,03 g/l in 5.060 l Fermentationsmedium (entspricht dem Volumen an Fermentationslösung, die in einem Reinigungsbatch verarbeitet wird). Es ergab sich eine BTM von 167 kg. Zu Beginn der Filtration liegen 23,06 kg Zielprotein und 143,94 kg Verunreinigungen vor. Es ergab sich für die Filtrationsschritte ein notwendiges Verhältnis $\frac{c_{\text{Retentat, Verunreinigung}}}{c_{0, \text{Verunreinigung}}}$ von 0,2. Ausgenommen von dieser Berechnung war die Diafiltration nach der Filtration mit 8 M Harnstoff, da hier von einem Rückhalt von 0% für Harnstoff ausgegangen wurde, aber eine Verringerung von 2 M auf 0,1 mM gefordert wurde (entspricht einer Verringerung auf 0,005%).

Für den Keramikfilter lag die mögliche Flussrate zwischen 120 und $200 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ ¹¹⁸, wodurch bei gleichlanger Filtrationsdauer nur die Filtrationsfläche variierte. Die Filtration sollte mit 1.000 l/h durchgeführt werden (Vorgabe AmSilk). Bei einer Fluxleistung von $120 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ berechnete sich eine Filterfläche mit Formel 18 von $8,3$ m² und bei $200 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ zu 5 m² (detaillierte Herleitung und Darstellung finden sich in Anhang M). Mit Formel 14 wurde ein notwendiger Diafiltrationsfaktor von 2 für die 1. Filtration berechnet, wodurch das Diafiltrationsvolumen 7.000 l beträgt (Formel 15).

Anschließend an die Diafiltration wurde eine Reduzierung des Volumens um 1.000 l auf 2.500 l angenommen, wodurch sich der gesamte Permeatvolumenstrom bei diesem Filtrationsschritt auf 8.015 l summierte. Da der Volumenstrom auf 1.000 l/h festgelegt wurde, berechnete sich die notwendige Filtrationszeit zu $8,3$ h.

Im anschließenden Prozessschritt wurde 10 M Natronlauge bis zu einer Konzentration von $0,05$ M zugegeben ($12,5$ l 10 M NaOH). Die Lösung wurde solange gerührt, bis die Membranproteine vollständig gelöst waren. Danach schloss sich der 2. Filtrationsschritt an. Das Volumen wurde auf 1.500 l reduziert und danach solange diafiltriert, bis rechnerisch nur noch ein Membranprotein-Restgehalt von 20% vorlag. Wie bei Filtration 1 wurde von einer Rückhaltung der Membranproteine von $19,7\%$ ausgegangen¹²⁴, da diese in der gleichen Größenordnung lagen. Dadurch ergab sich ebenfalls ein Diafiltrationsfaktor von 2 . Im Anschluss wurde das Volumen auf 1.000 l reduziert, und die Lösung durch Titration mit konzentrierter Salzsäure neutralisiert. Danach wurde Harnstoff zu der 1.000 l Lösung bis zu einer Konzentration von 8 M zugegeben ($755,5$ kg Urea, Endvolumen 1.572 l). Damit sich der Harnstoff lösen konnte, muss die Lösung geheizt werden (die Berechnung dazu findet sich in Anhang M Filtration 2). Die Lösung wurde danach wieder auf 1.000 l reduziert. Der gesamte Permeatvolumenstrom summierte sich beim 2. Filtrationsschritt auf 5.078 l. Bei einem Volumenstrom von 1.000 l/h berechnete sich die Filtrationsdauer zu $5,1$ h.

Im folgenden Prozessschritt wurde beim 3. Filtrationsschritt zunächst mit einem Diafiltrationsfaktor von 2 und dadurch einem Volumen von 2.004 l 2 M Harnstoff diafiltriert und dann das Volumen auf 250 l reduziert. Anschließend sollte der Harnstoff bis zu einem Restgehalt von unter $0,03\%$ ausgewaschen werden, was einer Harnstoffkonzentration nach dem Diafiltrationsschritt von unter $0,4$ µM entspricht (Rückhalt Produkt $99,5\%$, Rückhaltung Harnstoff 0%). Dieser Wert liegt 4 bis 20 -fach niedriger als der Normwert für die Harnstoffkonzentration im Blut¹²⁹ S.27 und wurde zur Orientierung für eine als unbedenklich geltende Konzentration verwendet. Es ergab sich ein Diafiltrationsvolumen von 2.475 l. Der gesamte Permeatvolumenstrom summierte sich auf 5.230 l. Bei einem Volumenstrom von 1.000 l/h be-

rechnete sich die Filtrationsdauer zu 5,2 h. In Abbildung 29 sind die Filtrationsschritte mit ihren Parametern zusammenfassend abgebildet.

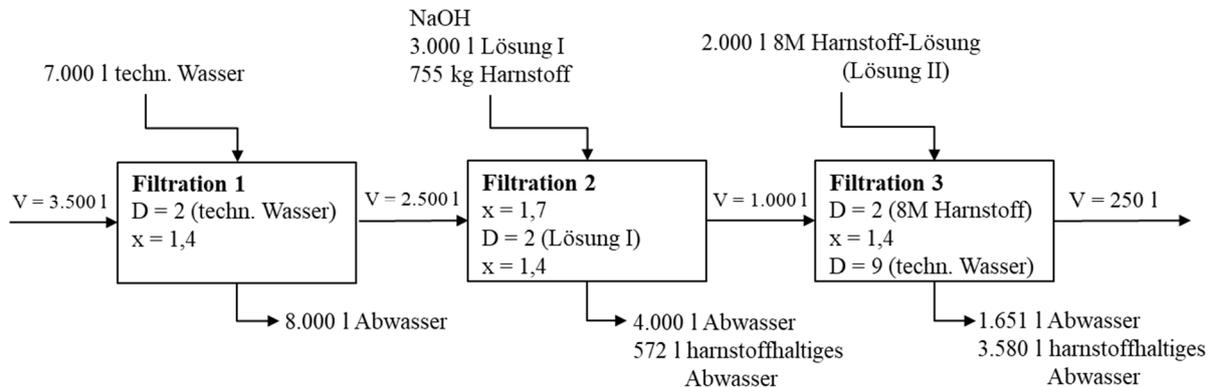


Abbildung 29: Zusammenfassung der Filtrationsschritte bei der Proteinreinigung
(D=Diafiltration, x=Konzentration, V=Volumen)

5.1.1.5.1 Abschätzung des Verlusts an Protein durch Durchtritt durch die Membran

Die Konzentration des Zielproteins nach durchgeführter Filtration kann für jeden Diafiltrationsschritt (Formel 12), sowie Konzentrierungsschritt (Formel 16) berechnet werden.

Bei Lee et al. 2004¹¹⁸ wurde der Verlust an Zielprodukt nicht quantifiziert, sondern nur angegeben, dass nahezu kein Produktverlust („*virtually no product loss*“) stattgefunden hatte. Rechnet man mit einer Rückhaltung des Zielproteins von 99,5%, d.h. 0,5% des Zielproteins passiert immer die Membran, summiert sich die Produktausbeute durch die aufeinander folgenden Filtrationsschritte auf 91%, für eine Rückhaltung von 98% auf 68%. Bei 95% Rückhalt, d.h. 5% des Zielproteins passiert die Membran, vermindert sich die Produktausbeute schon auf nur 39% (Tabelle 5). Die in der Literatur berichteten Größen von überexprimierten Proteinaggregaten liegen zwischen $0,81 \pm 0,17 \mu\text{m}$ (γ -interferon) und $1,28 \pm 0,46 \mu\text{m}$ (prochymosin)¹²⁵ und allgemein zwischen 0,5 und $1,3 \mu\text{m}$ ¹²⁶. Deswegen war nicht zu erwarten, dass bei einer Porengröße der Membran von $0,1 \mu\text{m}$ 5% des Zielproteins durch die Membran wandern. Wenn am Ende der Fermentation ein Teil des Zielproteins in kleineren Aggregaten vorliegen würde und man deswegen bei der ersten Filtration mit einem Durchgang von Zielprotein durch die Membran von 10% und bei den weiteren Filtrationsschritten von 0,5% rechnet, ergibt sich eine Gesamtausbeute von 75%. Bei 10% Verlust bei der ersten Filtration und 0% bei den restlichen Filtrationen wäre die maximal zu erreichende Ausbeute 82% (Tabelle 5).

5.1.1.5.2 Abschätzung des Verlusts an Protein durch Adsorption an der Membran

Typische Werte für die Adsorption von Protein an Membranen liegen zwischen 0,1 bis 0,5 g/m²¹²⁸. Der Verlust an Zielprotein durch Adsorption an Membranen berechnete sich bei 25 m² mit einer Adsorption von 0,5 g/m² Filterfläche nach Formel 19 zu 12 g.

$$\Delta m_{\text{Protein}} = A_{\text{Filter}} \cdot \left(\frac{\Delta m}{A} \right)_{\text{Protein}} \quad \text{Formel 19}$$

$\Delta m_{\text{Protein}}$	Masse an Protein [kg]
A_{Filter}	Filterfläche [m ²]
$\left(\frac{\Delta m}{A} \right)_{\text{Protein}}$	Absorption pro Fläche [g/m ²]

Nach der Ernte mit dem Separator und dem Zellaufschluss ergab sich eine Produktkonzentration von 6,82 g/l in 3.500 l Lösung, d.h. 23,06 kg Protein. Nimmt man statt dem Gesamtprotein zunächst nur das Zielprotein als Berechnungsgrundlage, entsprechen 12 g von 23,06 kg 0,055% des Produkts (Tabelle 5). Der Verlust durch Adsorption an der Membran war somit geringfügig und wurde für weitere Betrachtungen vernachlässigt.

In Tabelle 5 sind alle Werte der Filtration nochmals zusammengefasst:

Tabelle 5: Gegenüberstellung der Gesamtwerte der Filtration

Membransystem	Keramik-Modul	
Fluxleistung [l/(m²*h)]	120 ¹¹⁸	200 ¹¹⁸
Aus Flux resultierende Filterfläche [m²]	25,00	15,00
Gesamtes Permeatvolumen [l]	18.323	
Gesamtausbeute Zielprotein		
Rückhalt 99,5% [%]	90,9	
Rückhalt 98,0% [%]	68,4	
Rückhalt 95,0% [%]	38,7	
1. Filtration Rückhalt 90%, restliche 99,5% [%]	75,17	
1. Filtration Rückhalt 90%, restliche 100% [%]	81,84	
Verlust d. Adsorption 0,1 g/m² [%]	0,011	0,007
Verlust d. Adsorption 0,5 g/m² [%]	0,055	0,033

5.1.1.5.3 Einfluss des Verbrauchs an Filtermaterial

Für den Einfluss auf die Wirkungsabschätzung der Herstellung der Spinnenseide sollte ebenso der Einfluss des ausgewählten Filtermaterials vorgenommen werden. Dazu musste berechnet werden, wie viel Filtermaterial pro Batch verbraucht wurde. Die durchschnittliche Standzeit eines Keramikfilters aus Zirkonoxid beträgt 60 Monate, d.h. 43.000 h^{121,122}. Die Filtration mit dem Keramikmodul betrug rechnerisch 18,3 h. Somit könnte die Keramikmembran für 2.360 x 5 m³ Reinigungen eingesetzt werden. Es berechnete sich ein theoretischer Verbrauch pro

Batch von $10,6 \cdot 10^{-3}$ bis $6,4 \cdot 10^{-3}$ m² Filterfläche. Bei einer Dichte des Keramikmoduls von 3,12 kg/m² (Abschätzung siehe Anhang N) berechnete sich ein theoretischer Verbrauch von $33,05 \cdot 10^{-3}$ bis $19,83 \cdot 10^{-3}$ kg Zirkonoxid pro 5 m³ Batch.

5.1.1.6 Sprühtrocknung

Zur Trocknung des Proteins im Anschluss an die Filtration wurde der Einsatz der Sprühtrocknungsanlage VSD 6.3 von GEA Niro angenommen. Diese Sprühtrocknungsanlage wies eine Kapazität von 50 kg/h auf. Die notwendige Trocknungsdauer berechnete sich abhängig von der Gesamtausbeute der Reinigungsschritte. Bei einer Gesamtausbeute von 86% wurde eine Trocknungsdauer von 5h bei einem 5 m³ Batch angenommen.

5.1.1.7 Größe der Prozessbehälter

Ausgehend von den ausgewählten Grundgeräten für Fermentation, Ernte und Proteinreinigung wurde die Summe aller verbrauchten Medien berechnet (Ergebnisse siehe 5.1.2) und darauf basierend die notwendigen Lagertanks geplant.

Die Lagertanks für die Fermentationsmedien wurden für eine 100 m³ Fermentation ausgelegt. Dadurch ergab sich aufgerundet ein Salz- und ein Ammoniakbehälter mit je 3.000 l, ein Behälter mit 10.000 l für Magnesiumsulfat und ein Glucosebehälter mit 30.000 l. Spurenelemente sollten durch eine Kleinmengenzugabe zugegeben werden, die im folgendem nicht weiter betrachtet wurde. Für die Proteinreinigung wurde eine Lagerhaltung an Medien für vier Fermentationsläufe vorgesehen (entsprechend einer in der Industrie üblichen Anlagenplanung durch persönliche Erfahrungen bei der Firma LSMW). Für den Lösungsbehälter I ergab sich dadurch eine Behältergröße von 12.000 l und für den Lösungsbehälter II ein Volumen von 8.000 l. Bei den verschiedenen Reinigungsschritten wurden für die Produktlösung je ein 3.500 l Behälter für die Ernte und den Filtrationsschritt 1 vorgesehen, für den Filtrationsschritt 2 ein 2.500 l und für den Filtrationsschritt 3 ein 1.000 l Behälter.

Für eine reale Anlagenplanung müsste aus Sicherheitsgründen ein Antifoambehälter berücksichtigt werden. Der Einsatz von Antifoam ist aber für den Normalbetrieb auszuschließen, da vorzugsweise mit Überdruck und mechanischen Schaumstörern gearbeitet wird⁸². Die Berücksichtigung des Verbrauchs wurde deshalb für die Modellierung nicht vorgenommen.

Zur besseren Veranschaulichung der geplanten Prozessbehälter ist in Abbildung 31, Seite 86 das Prozessfließbild dargestellt.

5.1.2 Stofflicher In- und Output

Die im Prozess benötigten Einsatzstoffe und Mengen der Lösungen zur Produktion von künstlichem Spinnenseidenprotein sind im Folgenden zusammengefasst.

5.1.2.1 Fermentation

In Tabelle 6 sind die Mengen an Medien für die gesamte Fermentation aufgeführt. Eine Zusammenfassung der berechneten Mengen zur Herstellung der Lösungen befindet sich im Anhang H.

Tabelle 6: Berechnete Gesamtmengen für die Fermentation

Bestandteil	100 m ³ Fermentation		bezogen auf 5 m ³	
Glucoselösung	28.129	1	1.406	1
Magnesiumsulfatlösung	10.502	1	525	1
Salze	2.793	1	140	1
Ammoniak 25%	2.903	1	145	L
IPTG (Bez. auf Start Ind.)	17,34	kg	0,87	kg
25% Ammoniak	1.807	1	1.807	1

In Tabelle 7 sind die Behältergrößen für die Medienbereitstellung aufgeführt. Diese Behälterabmessungen waren notwendig, um die dafür vorzusehenden Mengen für SIP und CIP zur Verfügung zu stellen.

Tabelle 7: Behältergrößen für die Medienbereitstellung

Bestandteil	Konzentration		Summe der Volumen		Nenngröße Behälter
Glucoselösung	410	g/l	28.129	1	30.000 l
Magnesiumsulfatlösung	200	g/l	10.502	1	10.000 l
Salze	300	g/l	2.793	1	3.000 l
Ammoniak	25	%	2.903	1	3.000 l

Es wurden für alle Fermentationen zusammen 7.121 kg Sauerstoff benötigt, dieser soll der Fermentation über die Verwendung von normaler Luft zur Verfügung gestellt werden. Mit 23,15 Gew.-% an Sauerstoff berechnete sich die Gesamtmasse an Luft zu 30.760 kg, dies entspricht 23.789 Nm³ Luft ($Q_{\text{Luft}} 1,293 \text{ kg/Nm}^3$) für eine 100 m³ Fermentation und 1.189 Nm³ bezogen auf 5 m³.

5.1.2.2 Proteinreinigung

Zum Waschen der Zellen nach der Fermentation wurden für die 100 m³ Fermentation 140 m³ technisches Wasser benötigt, somit 7 m³ bezogen auf 5 m³ Reinigungsbatchgröße. Lösung I bestand aus 50 mM Tris/HCl bei pH 8,0 und 100 mM NaCl, Lösung II aus 8 M Harnstoff.

Tabelle 8: Lösungen und technisches Wasser für Filtrationsschritte (5 m³ Batch)

Medien	Volumen in l
Wasser	9.491
Lösung I	3.006
Lösung II	2.004

Tabelle 9: Stoffmengen bei der Proteinreinigung (5 m³ Batch)

Lösung	Menge	Einheit
Lösung I	1	m ³
Tris(hydroxymethyl)aminomethan	6,057	kg
Salzsäure (konz., 32 %)	0,0033	m ³
Natriumchlorid	5,844	kg
Wasser technisch	0,993	m ³
Natriumhydroxid (von Bereitstellung CIP)		
10 M NaOH	1	m ³
Lösung II	1	m ³
Harnstoff	120	kg
Wasser technisch	0,909	m ³

Für die Proteinreinigung sollten jeweils Lösungen für vier Batchvolumina vorgehalten werden (entsprechend einer in der Industrie üblichen Anlagenplanung durch persönliche Erfahrungen bei der Firma LSMW). Für Lösung I musste ein Behälter mit 12.000 l und für Lösung II mit 8.000 l vorgesehen werden. Die Behältergrößenplanung war notwendig, um die dafür vorzusehenden Mengen für die Reinigung durch SIP und CIP zur Verfügung stellen zu können.

5.1.2.3 Sterilisation und Reinigung des Prozessequipments

Bei der Fermentation musste sichergestellt sein, dass keine Keime ins Medium gelangen, da sich sonst statt den *E. coli* Bakterien andere Mikroorganismen vermehren könnten. Um dies zu verhindern wurde vorgesehen die Fermenter vor dem Einsatz zu sterilisieren und das Medium steril in den Behälter zu überführen. Für weitere Produktionsschritte musste nur sauber, aber nicht steril gearbeitet werden, weswegen für das andere Prozessequipment zur Reinigung nur das Spülen mit 80 °C heißer Natronlauge vorgesehen wurde. Zur Abschätzung der Menge an Dampf für die Sterilisation der Fermenter, dem sogenannten Steam-in-Place (SIP), und die für die Reinigung, dem sogenannten Clean-in-Place (CIP), notwendige Menge an Reinigungslösung, sowie Wasser zum Nachspülen, wurde mittels eines Excel-Berechnungsprogramms der Verbrauch für jeden einzelnen Behälter berechnet. Dazu wurden die Abmessungen des Behälters eingetragen und mit Berechnungsformeln nach DIN 28136¹⁴⁹ und dem ASME BPE Guide 2007¹⁵⁰ die Mengen an Dampf, Reinigungsmedium, Nachspülwasser und Kühlenergie berechnet. Die jeweiligen Behälterdaten sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Tabelle 10: Behälterabmessungen

Bezeichnung	Anzahl	Nennvolumen [l]	Außendurchmesser [mm]	Gesamthöhe [mm]	Wandstärke [mm]
10 l Fermenter	1	10	220	440	3
100 l Fermenter	1	100	450	927	4
1.000 l Fermenter	1	1.000	950	2.020	8
100.000 l Fermenter	1	100.000	4.000	10.000	20
3.000 l Salze / Ammoniak	2	3.000	1.550	2.353	8
10.000 l Magnesiumsulfat	1	10.000	2.200	3.850	12
30.000 l Glucose	1	30.000	3.200	5.340	16
1.000 l Rührbehälter Produkt	1	1.000	1.200	1.556	6
2.500 l Rührbehälter Produkt	1	2.500	1.600	2.065	8
3.500 l Rührbehälter Produkt	2	3.500	1.750	2.274	10
8.000 l Lösung II	1	8.000	2.150	3.181	10
12.000 l Lösung I	1	12.000	2.350	3.909	12

Der Verbrauch von Separator, Hochdruckhomogenisator, Filtration und Sprühtrockner wurde über die Berechnung des Verbrauchs eines 50 l Behälters angenähert. Der Behälter mit 25%igem Ammoniak galt als autosteril und dessen Reinigung wurde nicht vorgesehen. Am Ende wurden die Mengen aufsummiert und ein Zuschlag von 10% für Rohrleitungen aufgeschlagen. In Tabelle 11 sind die Mengen an Dampf für das SIP bei Leersterilisation der Fermenter aufgeführt und in Tabelle 12 der Verbrauch an Reinigungslösung und Wasser für das CIP aller Behälter und Geräte.

Tabelle 11: SIP-Verbrauch der Fermenter (bei Leersterilisation)

Bezeichnung	Aufheizen [kg/h]	Reinstdampf Aufheizen [kg]	Halten 30 min [kg/h]	Reinstdampf Halten [kg]	Summe Reinstdampf [kg]
10 l Fermenter	1,21	0,61	2,02	1,01	1,62
100 l Fermenter	4,25	2,13	2,66	1,33	3,46
1.000 l Fermenter	31,54	15,77	6,01	3,00	18,77
100.000 l Fermenter	1.276,27	638,13	57,16	28,58	666,72
Summe pro 100 m ³ Fermentation					690,56
Summe pro 5 m ³ Batch					34,53
Summe pro 100 m³ Fermentation mit 10% Rohrleitungszuschlag					759,62
Summe pro 5 m³ Batch mit 10% Rohrleitungszuschlag					37,98

Tabelle 12: CIP-Verbrauch und entstehendes Abwasser (5 m³ Batch)

Summe technisches Wasser entspricht Wasser zum Vor- und Nachspülen, wobei die zweite Hälfte des Nachspülwassers zum Vorspülen wiederverwendet wurde. Das Abwasser ist die Summe aus neutralisierter Lauge und techn. Wasser, der Ammoniakbehälter ist autosteril und das Spülen wurde nicht vorgesehen.

Bezeichnung	Anzahl	Reinigung pro Batch	Rezirkulation Lauge [m ³]	Summe techn. Wasser [m ³]	Abwasser [m ³]
10 l Fermenter	1	0,05	0,00	0,02	0,02
100 l Fermenter	1	0,05	0,00	0,03	0,03
1.000 l Fermenter	1	0,05	0,02	0,05	0,07
100.000 l Fermenter	1	0,05	1,20	0,28	1,48
3.000 l Salze / Ammoniak	2	0,05	0,06	0,11	0,16
10.000 l Magnesiumsulfat	1	0,05	0,14	0,14	0,28
30.000 l Glucose	1	0,05	0,40	0,20	0,60
1.000 l Rührbehälter Produkt	1	1,00	0,55	1,64	2,20
2.500 l Rührbehälter Produkt	1	0,25	0,27	0,55	0,82
3.500 l Rührbehälter Produkt	2	0,50	0,57	1,08	1,65
8.000 l Lösung II	1	0,25	0,56	0,65	1,21
12.000 l Lösung I	1	0,25	0,90	0,83	1,73
Separator	5	1,25	0,08	0,56	0,64
Hochdruckhomogenisator	1	0,25	0,02	0,11	0,13
Filtration1	1	0,25	0,02	0,11	0,13
Filtration2	1	0,25	0,02	0,11	0,13
Filtration3	1	0,25	0,02	0,11	0,13
Sprühtrockner	1	0,25	0,02	0,11	0,13
Summe			4,56	6,15	10,70
Summe mit 10% Rohrleitungszuschlag			5,32	7,36	12,68

Für die Kühlleistung wurde für jeden Behälter mit den Behältermaßen das Behältergewicht abgeschätzt und die Kühlleistung mit der Wärmekapazität für Stahl, der abzukühlenden Temperaturdifferenz und einem Verlust der Kühlleistung gerechnet (Formel 26). Für das SIP wurde wegen des direkt anschließenden CIPs nur mit einer Abkühlung von 125 auf 90 °C gerechnet, für das CIP mit einer Abkühlung von 80 auf 20 °C. Am Ende wurden die Mengen addiert und wieder ein Zuschlag von 10% für Rohrleitungen aufgeschlagen. Die Daten sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Verbrauch an Kühlenergie für SIP und CIP (5 m³ Batch)

Bezeichnung	Anzahl	Reinigung pro Batch	Summe Kühlenergie SIP [MJ]	Summe Kühlenergie CIP [MJ]
10 l Fermenter	1	0,05	0,043	0,002
100 l Fermenter	1	0,05	0,152	0,007
1.000 l Fermenter	1	0,05	1,129	0,048
100.000 l Fermenter	1	0,05	45,676	1,958
3.000 l Salze / Ammoniak	2	0,05		0,146
10.000 l Magnesiumsulfat	1	0,05		0,410
30.000 l Glucose	1	0,05		0,988
1.000 l Rührbehälter Produkt	1	1,00		26,531
2.500 l Rührbehälter Produkt	1	0,25		3,342
3.500 l Rührbehälter Produkt	2	0,50		17,619
8.000 l Lösung II Keramik	1	0,25		7,547
12.000 l Lösung I Keramik	1	0,25		11,136
Separator	5	1,25		0,058
Hochdruckhomogenisator	1	0,25		0,002
Filtration1	1	0,25		0,002
Filtration2	1	0,25		0,002
Filtration3	1	0,25		0,002
Sprühtrockner	1	0,25		0,002
Summe			47,00	69,80
Summe mit 10% Rohrleitungszuschlag			51,70	76,78

In Summe berechnete sich 128,5 MJ Kühlenergie, davon wurden 80% der abzuführenden Wärme für das Aufheizen der CIP-Lösung wiederverwendet, so dass nur 20% der berechneten Kühlenergie, d.h. 25,7 MJ, tatsächlich aufgewendet werden mussten.

In Tabelle 14 sind die benötigten Einsatzstoffe zur Reinigung des Prozessequipments bei der Produktion pro 5 m³ Batchvolumen zusammengefasst.

Tabelle 14: Stoffmengen und Kühlenergie zur Equipment-Reinigung (5 m³ Batch)

Substanz	Menge	Einheit
Dampf (SIP)*	37,98	kg
Reinigungslösung (0,1 M NaOH)	5,32	m ³
Wasser technisch (Nachspülen)	7,36	m ³
Neutralisationslösung (10 M HCl)	0,0532	l
Kühlenergie	128,5	MJ

*nur für Fermenter

5.1.2.4 Abwasser

In Tabelle 15 sind die Volumina der anfallenden Abwassermengen aufgeführt. Für das Abwasser der Ernte und Filtration wurde eine gemeinsame Entsorgung vorgesehen. Über eine Betrachtung der Stoffe, die bei der Fermentation und Proteinreinigung zugegeben und anschließend wieder abgetrennt werden, war es möglich die Zusammensetzung des Abwassers

zu bilanzieren. Dies war notwendig, um die Abwasserentsorgungsmodule von ecoInvent verwenden zu können. Für die harnstoffhaltige Fraktion des Abwassers der Filtration wurde eine separate Abführung und Aufbereitung vorgesehen. Die in diesem Teil des Abwassers enthaltene Menge an Proteinen des Produktionsorganismus wurde nicht gesondert berücksichtigt, da die Menge im Vergleich zu den Bestandteilen im restlichen Abwasser sehr gering war. Die Entsorgung und Behandlung dieser Proteine wurden beim Abwasser der Ernte und Filtration berücksichtigt.

Tabelle 15: Abwassermengen bei den jeweiligen Prozessschritten (5 m³ Batch)

Abwasser	Mengen	Einheit
Ernte	8.500	l
Filtration 1, 2, 3	18.324	l
davon harnstoffhaltige Fraktion	4.152	l
Sprühtrocknen	0,25	l
Abwasser nach CIP neutralisiert	12.68	l

5.1.2.4.1 Harnstoffhaltige Abwasserfraktion und Harnstoffrecycling

Das Volumen des harnstoffhaltigen Abwassers berechnete sich aus der Menge, die nach der Zugabe von Harnstoff abgetrennt wurde (572 l, 8 M), dem Anteil des Volumens der Diafiltration zum Auswaschen der Verunreinigungen (2.004 l, 8 M), dem Volumen, dass bei der Volumenreduktion abgeführt wurde (750 l, 8 M) und dem ersten Drittel des Volumens an Wasser zum Abtrennen des Harnstoffs vom gereinigten Protein (826 l, 8 M bis 0,3 M). Das Gesamtvolumen betrug 4.152 l mit 6,27 M Harnstoff (Berechnung in Anhang P). Nach Abtrennung der Proteine durch einen Aufbereitungsfiltrationsschritt würde die verbleibende harnstoffhaltige Lösung in einem ersten Schritt auf 8 M konzentriert werden. Davon würden dem Prozess die für Filtration 3 notwendigen 2.004 l von Lösung II aufbereitet zur Verfügung gestellt werden (als Closed-loop Recycling). Der restlichen 8 M harnstoffhaltigen Lösung würde mit einem weiteren Aufbereitungsfiltrationsschritt möglichst viel Wasser entzogen, und dem Prozess in Filtration 2 von den notwendigen 755,5 kg Harnstoff, 726,8 kg als feuchter, teilkristalliner Harnstoff zugeführt werden (als Closed-loop Recycling). Zur Vereinfachung der Modellierung wurde angenommen, dass der Harnstoff in gleicher Qualität (also trocken), wie der ursprüngliche Rohstoff, zugeführt wird.

5.1.2.4.2 Zusammensetzung des Abwassers von Ernte und Filtration

Die Zusammensetzung des Abwassers konnte über alle zugegebenen Stoffe berechnet werden. Glucose wurde zum Teil zur Energiebereitstellung verbraucht und in Kohlendioxid und Wasser umgesetzt, sowie als Kohlenstoffquelle zum Aufbau der Zellmasse verwendet. Aus der

Berechnung der Wärmemenge, die bei der Fermentation freigesetzt wurde, konnte der Anteil der Glucose, die für die Energiebereitstellung herangezogen wurde, abgeleitet werden. Aus der Berechnung der Wärmemenge ergaben sich für alle Fermentationen ein Glucoseverbrauch von 11.312,7 kg und ein Sauerstoffbedarf von 7.661,3 kg.

Mit der Reaktionsgleichung zur vollständigen Verstoffwechslung von Glucose mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser ($C_6H_{12}O_6 + 6 O_2 \rightarrow 6 CO_2 + 6 H_2O$) konnte mit Formel 20 über die Molverhältnisse mit dem Sauerstoffbedarf der Anteil an Glucose berechnet werden, der für die Energiebereitstellung benötigt wird:

$$m(\text{Substrat})_{\text{für Energie}} = \frac{m(O_2) \cdot M(\text{Substrat})}{z(O_2) \cdot M(O_2)} \quad \text{Formel 20}$$

$C_6H_{12}O_6$	Glucose
$m(\text{Substrat})$	Masse des Substrats [g]
$m(O_2)$	Masse des Sauerstoffs [g]
$M(\text{Substrat})$	Molmasse des Substrats [g/mol]
$M(O_2)$	Molmasse des Sauerstoffs [g/mol]
$z(O_2)$	Anzahl Sauerstoffmoleküle bei der Reaktions

$$m(C_6H_{12}O_6)_{\text{für Energie}} = \frac{m(O_2) \cdot M(C_6H_{12}O_6)}{z(O_2) \cdot M(O_2)} = \frac{7.661,3 \text{ kg} \cdot 180,16 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{6 \cdot 32 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 7.186,4 \text{ kg}$$

$$m(C_6H_{12}O_6)_{\text{für Zellmasse}} = m(C_6H_{12}O_6)_{\text{Gesamt}} - m(C_6H_{12}O_6)_{\text{für Energie}}$$

$$m(C_6H_{12}O_6)_{\text{für Zellmasse}} = 4.126,3 \text{ kg}$$

Es wurden von den *E. coli*-Bakterien 4.126,3 kg Glucose zum Aufbau von Biomasse verwendet. Das Abwasser setzte sich demnach aus den zugegebenen Medienbestandteilen und den Stoffwechselprodukten, Zelltrümmern und Proteinen des Produktionsorganismus, die durch den Verbrauch an Glucose aufgebaut wurden, sowie den Lösungen und Hilfsmitteln der Proteinreinigung zusammen (Abbildung 30). Bezogen auf eine 100 m³ Fermentation wurde am Ende der Filtration 506 kg Spinnenseidenprotein in 5 m³ Wasser zurückgehalten (Verlust nicht berücksichtigt, da bezogen auf die Gesamtmasse sehr klein, Berechnung der molaren Masse von Spinnenseide im Anhang Q).

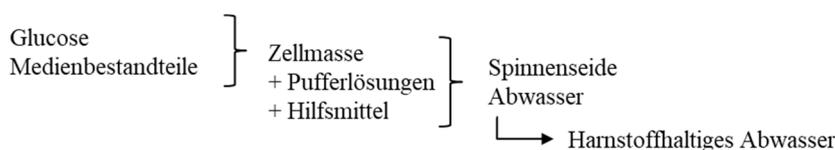


Abbildung 30: Übersicht über Verwendung von Glucose und entstehendes Abwasser bei Ernte und Filtration

Mit dem berechneten stofflichen Input und Output aller Substanzen konnte die Gesamtmenge an Feststoff für den Prozess aufsummiert werden (Tabelle 16, Tabelle 17). Es konnte die Gesamtmasse des Abwassers abzüglich des Feststoffanteils mit der Annahme berechnet werden, dass eine verdünnte Lösung eine Dichte von 1.000 kg/m^3 hat. Mit der Gesamtmenge an Wasser konnte die Konzentration jeder Substanz im Abwasser berechnet werden (Tabelle 16, Spalte „Konzentration“). Mit der Konzentration jeder Substanz konnte mit der jeweiligen Anzahl an Atomen im Molekül und der Molmasse die Konzentration der chemischen Elemente berechnet werden, die im Abwasser enthaltenen sind (Tabelle 18). Die Berechnungen dieser Konzentrationen waren für die anschließende Verwendung der ecoInvent-Module notwendig.

Tabelle 16: Bilanzierung der Substanzen im Abwasser, bezogen auf eine 100 m^3 Fermentation inkl. vollständiger Reinigung

Die Konzentration jeder Substanz (letzte Spalte) berechnete sich mit der in Tabelle 17 bilanzierter Menge an Wasser

Materialien Input	Molare Masse [g/mol]	Menge total [kg]	Konzentration [kg/l]
Glucose	180,2	11.522,0	2,54E-02
Sauerstoff	32,0	7.113,9	1,57E-02
Kaliumdihydrogenphosphat	115,0	838,0	1,85E-03
Diammoniumhydrogenphosphat	132,1	252,0	5,56E-04
Zitronensäure	192,1	107,0	2,36E-04
Magnesiumsulfat	246,5	2.100,5	4,63E-03
Kanamycin	582,6	2,2	4,85E-06
Ammoniak	17,0	726,0	1,60E-03
EDTA	292,2	1,3	2,90E-06
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	207,0	0,4	8,93E-07
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	197,9	2,3	5,13E-06
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	170,5	0,3	5,58E-07
H_3BO_3	61,8	0,5	1,12E-06
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	205,9	0,4	8,93E-07
$\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	219,5	1,6	3,57E-06
Fe (III) citrat * $2\text{H}_2\text{O}$	280,7	4,0	8,93E-06
Lösen der Zelltrümmer + Neutr.	76,4	191,1	4,21E-04
Tris (Puffer)	121,1	364,1	8,03E-04
HCl (zum pH-Wert einstellen)	36,5	73,0	1,61E-04
NaCl (Puffer)	58,4	351,3	7,75E-04
Harnstoff	60,1	28,7	6,33E-05

Materialien Output	Molare Masse [g/mol]	Menge total [kg]	Konzentration [kg/l]
Kohlendioxid durch Stoffwechsel	44,0	9.790,0	2,16E-02
Wasser durch Stoffwechsel	18,0	4.004,1	8,83E-03
Wasser in Lösung nach Filtration	18,0	4.494,0	9,91E-03
Spinnenseidenprotein eADF(C16)	56.879	506,0	1,12E-03

Tabelle 17: Bilanzierung der Menge an Feststoff und Wasser im Abwasser, bezogen auf eine 100 m³ Fermentation inkl. vollständiger Reinigung

Summierte Massenströme	Menge [kg]
Masse Input	23.681
Masse Input + Spinnenseide	24.187
Abwasser nach Ernte	170.000
Abwasser nach Filtration (ohne Urea)	283.440
Menge Abwasser	453.440
davon Wasser	429.253

Tabelle 18: Konzentration der im Abwasser enthaltenen chemischen Elemente

Chemisches Element	Symbol	Konzentration [kg/m ³]
Kohlenstoff	C	4,22E+00
Schwefel	S	5,99E-01
Stickstoff	N	1,29E+00
Phosphor	P	6,29E-01
Bor	B	1,95E-04
Chlor	Cl	2,31E-01
Cobalt	Co	2,54E-04
Kupfer	Cu	2,08E-04
Mangan	Mn	1,42E-03
Molybdän	Mo	4,16E-04
Zink	Zn	1,77E-03
Eisen	Fe	1,06E-03
Kalium	K	6,27E-01
Magnesium	Mg	4,57E-01
Natrium	Na	1,45E-01

5.1.2.4.3 Abwasser des SIP und CIP der Equipment-Reinigung

Für die Verwendung der ecoInvent-Module zur Klärung des Abwassers der Equipment-Reinigung musste der Anteil der im Abwasser enthaltenen Stoffe berechnet werden. Es wurde eine äquimolare Menge an Natronlauge (NaOH) zur Reinigung, und Salzsäure (HCl) zur Neutralisation der Natronlauge angenommen. Dies führte in Summe zu einer äquimolaren Menge an Natrium- und Chlorid-Ionen. Dadurch konnte bezogen auf die Gesamtmenge des Abwassers die Konzentration des Natriumchlorids im Abwasser mit Formel 21 berechnet werden (Tabelle 19). Der Anteil betrug 2,45 kg/m³.

$$c = \frac{n}{V}$$

Formel 21

c Konzentration [mol/l]

n Stoffmenge [mol]

V Volumen [l]

$$\frac{c_{\text{Reinigungslösung}} \cdot V_{\text{Reinigungslösung}}}{V_{\text{Abwasser, Reinigung}}} \cdot M(\text{NaCl}) = \frac{0,1 \text{ M} \cdot 5,32 \text{ m}^3}{12,68 \text{ m}^3} \cdot 58,44 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 2,45 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 2,45 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabelle 19: Konzentration der im Abwasser enthaltenen chemischen Elemente

Chemisches Element	Symbol	Konzentration [kg/m ³]
Chlor	Cl	2,45
Natrium	Na	2,45

5.1.3 Energetischer In- und Output

Um die im Prozess notwendigen Mengen an Energien bei der Modellierung zu berücksichtigen, wurden die Daten der Auslegung des Hauptequipments zusammengeführt.

5.1.3.1 Strombedarf und erzeugte Wärme

5.1.3.1.1 Strombedarf und erzeugte Wärme der Rührwerke

Für den 100.000 l Fermenter wurde die Leistungsdichte genau bestimmt und mit der Volumenzunahme eine Stromaufnahme während der Fermentation von 52.156 MJ berechnet (5.1.1.2.3). Für alle anderen Rührbehälter konnte eine Leistungsdichte ε_R je nach Aufgabe angenommen werden^{72 S631}. Für die Vorfermenter wurde aufgrund der Viskosität der Fermentationslösung eine Leistungsdichte von 5,0 W/kg angenommen. Für die anderen Behälter mit der Aufgabe des Suspendierens wurde der Wert 0,3 W/kg verwendet. Die Berechnung der Leistung erfolgte nach Formel 7.

Die für 5 m³ Batchvolumen benötigte Strommenge wurde mit der Einsatzzeit und dem Faktor, wie oft ein Behälter pro Batch läuft, berechnet. Die beim Rühren eingetragene Wärmemenge wurde über die Stromaufnahme ohne Reibungsverlust des Getriebes abgeschätzt und mit 1,3 geteilt.

Tabelle 20: Zusammenstellung der Stromaufnahme und der erzeugten Wärmemengen der Rührwerke (5 m³ Batch)

V=Volumen, AG=Rühraufgabe (D=Dispergieren, S=Suspendieren), ϵ_R =Leistungsdichte, ρ =Dichte, P_R =Leistung der Rührwerks, t=Einsatzdauer/Laufzeit, f_B =Einsatzfaktor pro Batch, E_R =Strombedarf Rührwerk, \dot{Q}_R =erzeugte Wärme durch Rühren

Beschreibung	V [m ³]	AG	ϵ_R [W/kg]	ρ [kg/m ³]	P_R [kW]	t [h]	f_B	E_R MJ	\dot{Q}_R [MJ]
Fermenter	100	D	4,5	1.050	289-479	40	0,05	3.390,1	2.607,8
Vorfermenter 1	0,01	D	5,0	1.050	0,1	8	0,05	0,1	0,1
Vorfermenter 2	0,1	D	5,0	1.050	0,7	8	0,05	1,0	0,8
Vorfermenter 3	1	D	5,0	1.050	6,8	8	0,05	9,8	7,6
Ammoniak	3	S	0,3	1.050	1,2	2	0,05	0,4	0,3
Salz	3	S	0,3	1.050	1,2	2	0,05	0,4	0,3
Magnesium	10	S	0,3	1.050	4,1	2	0,05	1,5	1,1
Glucose	30	S	0,3	1.050	12,3	2	0,05	4,4	3,4
Lösung I	12	S	0,3	1.050	4,9	2	0,25	2,5	1,9
Lösung II	8	S	0,3	1.050	3,3	2	0,25	1,6	1,3
Ernte	3	S	0,3	1.200	1,6	8	1,00	13,1	10,1
Filtration 1	3	S	0,3	1.200	1,6	5	1,00	8,2	6,3
NaOH	2	S	0,3	1.200	1,2	2	1,00	2,3	1,8
Filtration 2	1	S	0,3	1.200	0,7	6	1,00	4,2	3,2
Urea	1	S	0,3	1.200	0,5	2	1,00	0,9	0,7
Filtration 3	1	S	0,3	1.200	0,5	5	1,00	2,3	1,8

5.1.3.1.2 Strombedarf und erzeugte Wärme bei der Filtration

Der Strombedarf und die erzeugte Wärme bei der Filtration berechneten sich nach Formel 22 und Formel 23.

Der Leistungsbedarf bei der Filtration kann mit dem Druckabfall Δp über das Filtersystem, dem Volumenstrom \dot{V} und der Einsatzdauer Δt abgeschätzt werden^{90 S330}. Δp kann zwischen 1 bis 2 bar angenommen werden (hier 2 bar) und \dot{V} kann als 10x Permeatstrom angenommen werden^{20 S332}:

$$E_{Filtration} = \Delta p \cdot 10 \cdot \dot{V} \cdot \Delta t \tag{Formel 22}$$

$E_{Filtration}$ Leistungsbedarf [kWh]

Zur Berücksichtigung des Wirkungsgradverlusts elektrische Geräte wurde der Leistungsbedarf der Filtration mit 1,3 geteilt^{72 S704}.

$$\dot{Q}_{Filtration} = \frac{E_{Filtration}}{1,3} \tag{Formel 23}$$

$\dot{Q}_{Filtration}$ Durch Filtration eingetragenen Wärmemenge [kJ]

In Tabelle 21 sind die Parameter der einzelnen Filtrationsschritte, sowie die Summe der erforderlichen Pumpleistung und erzeugten Wärme aufgeführt. Es wurde mit einer minimalen und maximalen Fluxleistung gerechnet, um den Einfluss auf die Filterfläche berechnen zu können und damit unter Berücksichtigung der Standzeit, d.h. Nutzungsdauer, des Filters den Einfluss des Verbrauchs des Filtermediums abschätzen zu können (siehe 7.1.3.3).

Tabelle 21: Strombedarf und erzeugte Wärme bei der Filtration (5 m³ Batch)

Membransystem	Keramik-Modul	
Fluxleistung [l/(m²*h)]	120	200
Volumenstrom [l/h]	1000	1000
Filterfläche [m²]	8,33	5,00
Dauer Filtration 1 [h]	8	
Pumpleistung Filtration 1 [kWh]	4,45	
Dauer Filtration 2 [h]	5,1	
Pumpleistung Filtration 2 [kWh]	2,82	
Dauer Filtration 3 [h]	4,2	
Pumpleistung Filtration 3 [kWh]	2,91	
Summe Pumpleistung [kWh]	10,18	
Summe Pumpleistung [MJ]	36,65	
Summe erzeugte Wärme [MJ]	28,19	

5.1.3.1.3 Strombedarf Pumpen

Die Stromaufnahme der im Prozess notwendigen Pumpen wurde mit Formel 24 gerechnet.

Die elektrische Leistung der Pumpen berechnet sich nach Storhas^{72 S705}:

$$E_p = P_p \cdot t = \dot{V} \cdot \Delta p \cdot 1,3 \cdot t$$

Formel 24

P_p elektrische Leistung der Pumpe [kWh]

\dot{V} Volumenstrom [l/h]

Δp Druckdifferenz [bar]

Zur Berücksichtigung des Wirkungsgradverlusts elektrische Geräte wurde ein Faktor von 1,3 einberechnet^{72 S704}.

Da der Stromverbrauch im Verhältnis zum Energieverbrauch der Rührwerke relativ gering war, wurde der Energieverbrauch der Pumpen für CIP und CIP-Abwasser nur grob abgeschätzt.

Tabelle 22: Zusammenstellung der Stromaufnahme der Pumpen (5 m³ Batch)

Beschreibung	Volumenstrom [l/h]	Volumen pro Batch [l]	Laufzeit [h]	Druckdifferenz [bar]	Verbrauch [kWh]	Faktor pro Batch	Verbrauch pro Batch [MJ]
Fermenter	3.000	101.205	33,7	1,0	3,65	0,05	0,66
Vorfermenter 1	50	10	0,2	1,0	0,00	0,05	0,00
Vorfermenter 2	500	100	0,2	1,0	0,00	0,05	0,00
Vorfermenter 3	500	1.000	2,0	1,0	0,04	0,05	0,01
Ammoniak	1.500	3.000	2,0	1,0	0,11	0,05	0,02
Salz	1.500	3.000	2,0	1,0	0,11	0,05	0,02
Magnesium	5.000	10.000	2,0	1,0	0,36	0,05	0,07
Glucose	10.000	30.000	3,0	1,0	1,08	0,05	0,20
Abwasser Ernte	1.500	170.000	113,3	1,0	6,14	0,05	1,11
Lösung I	1.500	12.000	8,0	1,0	0,43	0,25	0,39
Lösung II	1.500	8.000	5,3	1,0	0,29	0,25	0,26
Ernte	1.500	17.500	11,7	1,0	0,63	1,00	2,28
Abwasser F1	1.000	8.000	8,0	1,0	0,29	1,00	1,04
Abwasser F2	1.000	5.000	5,0	1,0	0,18	1,00	0,65
Abwasser F3	1.000	5.320	5,3	1,0	0,19	1,00	0,69
CIP+Abwasser	1.500	19.000	12,7	2,0	1,37	1,00	4,94

5.1.3.1.4 Strombedarf und erzeugte Wärmemengen weiterer Geräte

Die elektrische Leistung der weiteren Prozessgeräte wurde über die Anschlussleistung und Einsatzdauer berechnet (siehe Formel 11). Da die Anschlussleistung ein Maximalwert ist, der in durchschnittlichen Anlagenbetrieb nicht erreicht wird, wurde bei allen weiteren Prozessgeräten durchschnittlich 70% der notwendigen Anschlussleistung zur Berechnung herangezogen und den Energiebedarf abzuschätzen¹¹⁵.

Die eingetragene Wärmemenge wurde über die Stromaufnahme ohne Reibungsverluste abgeschätzt ($\dot{Q}_R = \frac{E_R}{1,3}$). Die Werte für Strombedarf und erzeugte Wärmemengen aller Geräte sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 23: Zusammenstellung der Stromaufnahme und Wärmemengen weiterer Prozessgeräte (5 m³ Batch)

Beschreibung	Anzahl	Anschlussleistung [kW]	Laufzeit [h]	Verbrauch pro Batch [MJ]	Wärmemenge pro Batch [MJ]
Separator groß	1	45,0	2,8	320,9	246,9
Homogenisator	1	66,0	1,0	183,0	131,7
Sprühtrockner	1	4,0	5,0	50,4	38,8

5.1.3.1.5 Filtration von harnstoffhaltigem Abwasser

Zur Aufbereitung des harnstoffhaltigen Abwassers und zum Abführen des technischen Wassers musste eine Filtration durchgeführt werden. Zur Klärung eines Liters Abwassers konnte, je nach Anforderung, ein Stromverbrauch von 0,05 bis 0,12 kWh für Ultrafiltrationen bzw. 2 bis 3 kWh für Umkehrosmose und Nanofiltrationen angenommen werden¹³⁰. Um das Abwasser wieder zu Prozesswasser aufzubereiten, wurde die Durchführung einer Umkehrosmose angenommen. Es wurde mit einem Energieverbrauch von 7,2 MJ und einer Kühlenergie von 5,54 MJ pro m³ Abwasser gerechnet¹³⁰.

5.1.3.1.6 Alternatives Szenario zur Entsorgung des Abwassers

Als Alternative der Entsorgung des entstehenden Abwassers der Ernte und Filtration, sowie der Equipment-Reinigung über die Kläranlage sollte eine mögliche Aufbereitung des Abwassers als Szenario untersucht werden. Einerseits sollte dadurch dem Prozess technisches Wasser zurückgeführt werden, andererseits sollte die konzentrierte nährstoffhaltige Fraktion des Abwassers der Ernte und Fermentation als Düngemittel weiterverwendet werden. Um das Abwasser der Equipment-Reinigung wieder zu Prozessabwasser aufzubereiten, müsste der Anteil an Natrium- und Chlorid-Ionen entfernt werden. Zum Konzentrieren des Abwassers und Abführen des technischen Wassers müsste eine Filtration durchgeführt werden. Für diese Prozessschritte wurde für beide Abwasserarten ein Energieverbrauch von 7,2 MJ und der Bedarf an Kühlenergie von 5,54 MJ pro m³ Abwasser angenommen.

Zur Verwendung des Abwassers als Düngemittel müsste dieses gegebenenfalls nach der Konzentrierung sterilisiert werden, um zu garantieren, dass keine vermehrungsfähigen Bakterien im Abwasser enthalten sind. Für diese Sterilisation wurden 80 kg Dampf und 4,2 MJ elektrische Energie pro m³ Abwasser angenommen¹³⁴.

5.1.3.2 Weitere Wärmemengen im Prozess und Pinch-Analyse

Im Prozess wurden an verschiedenen Stellen Lösungen in Behältern und Volumenströme erwärmt und abgekühlt. Die Berechnung dieser einzelnen Wärme- und Kühlmengen befindet sich im Anhang R. In Tabelle 24 und Tabelle 25 sind die zu- und abzuführenden Wärmemengen aller Prozessschritte aufgeführt.

Es wurde mithilfe einer Pinch-Analyse (3.3.13) untersucht, ob die Möglichkeit zur Wieder- bzw. Weiterverwendung erzeugter Wärmemengen besteht, um in der Gesamtbilanz Energie zu sparen. Bei einer Pinch-Analyse muss nicht nur die Energiemenge, sondern auch das Temperaturniveau betrachtet werden. Bei der Hauptfermentation wird viel Energie freigesetzt,

welche allerdings auf einem unbrauchbaren Temperaturniveau liegt und nicht sinnvoll für die Erwärmung anderer Flüssigkeiten genutzt werden kann. Es wird nur die Menge an Kühlenergie abgezogen, die durch Zugabe des kälteren Mediums bei der Fermentation nicht abgeführt werden muss. Für die Berechnung der Kühlenergie wurde schon beim SIP nur eine Abkühlung bis 90 °C berücksichtigt, da anschließend eine Reinigung der Behälter (CIP) bei 80°C angenommen wurde. Es besteht somit beim Herstellungsprozess der Spinnenseide keine Möglichkeit, ohne unverhältnismäßigen Aufwand, die Einsparung von Energien umzusetzen.

Tabelle 24: Zusammenfassung abzuführender Wärmemengen pro 5 m³ Batchvolumen

Bezeichnung	Wärmemenge [MJ]	Temperatur
$\Delta Q_{Vorfermenter}$	-4,4	37 °C
$\Delta Q_{Hauptfermenter}$	-5.055,3	37 °C, 25 °C
$\Delta Q_{Abkühlen\ Ferm.-lösungen}$	-179,1	37 °C → 30°C
$\Delta Q_{Abkühlung\ nach\ Fermentation}$	-444,1	25 °C → 4°C
$\Delta Q_{Puffer\ Ernte}$	-448,0	20 °C → 4°C
$\Delta Q_{F1,Keramik}$	-449,0	20 °C → 4°C
$\Delta Q_{F2,Abkühlen\ nach\ Herstellung\ Urea1}$	-62,9	30 °C → 20 °C
$\Delta Q_{10\ M\ NaOH-Lösung}$	-26,7	80 °C
$\Delta Q_{HCl-Verdünnung}$	-0,7	20 °C
$\Delta Q_{Neutralisation}$	-0,9	20 °C
$\Delta Q_{SIP,5.000l}$	-51,7	121 °C → 90°C
$\Delta Q_{CIP,Keramik}$	-76,78	80 °C → 20°C

Tabelle 25: Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen pro 5 m³ Batchvolumen

Bezeichnung	Wärmemenge [MJ]	Temperatur
$\Delta Q_{Erwärmung\ Batch-Lösungen}$	+223,8	20 °C → 37°C
$\Delta Q_{F2,Temperieren\ auf\ RT}$	+267,5	4 °C → 30°C
$\Delta Q_{F2,Lösen\ Urea1}$	+195,0	30 °C
$\Delta Q_{F3,Lösen\ Urea2\ pro\ m^3}$	+124,0	20 °C
$\Delta Q_{CIP-Lösung,Fermentation\ 5.000l}$	+493,5	20 °C → 80 °C
$\Delta Q_{CIP-Lösung,Keramik}$	+812,6	20 °C → 80 °C

5.1.3.3 Zusammenfassung der Energien pro 5 m³ Batchvolumen

In Tabelle 26 und Tabelle 27 sind die für die verschiedenen Prozessschritte notwendigen elektrischen und thermischen Energien, sowie die Kühlenergien zusammengefasst.

Tabelle 26: Zusammenfassung elektrischer und thermischer Energie pro 5 m³ Batchvolumen

Prozessschritt	Energie elektrisch: Verbrauch durch Rührwerke, Pumpe und Gerätebetrieb	Energie thermisch: Verbrauch durch Wärmemenge zum Erwärmen von Lösungen
	[MJ]	[MJ]
Glucose	4,6 ^{a)}	
Magnesiumsulfat	1,5 ^{a)}	
Salze	0,5 ^{a)}	
Fermentationen	3.401,7	223,8
Ernte Separator klein	786,3	
Ernte Separator groß	247,8	
Zellaufschluss	183,0	
Lösung I	2,8 ^{a)}	
Lösung II	1,9 ^{a)}	124,0
Filtration Keramik	57,0	462,5 ^{b)}
Sprühtrockner	50,4	
SIP/CIP Keramik	4,9	261,2 ^{c)}

a) Pro 1 m³ Volumen Verbrauch an elektrischer Energie von 3 MJ

b) Energie für Lösen Urea in Summe

c) Energie für CIP in Summe mit 80%iger Wärmerückgewinnung

Tabelle 27: Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen für 5 m³ Batchvolumen

Prozessschritt	erzeugte Wärme durch Rührwerke und Pumpen	berechnete abzuführende Wärmemengen	Summe Kühlenergie
	[MJ]	[MJ]	[MJ]
Glucose	3,6		- ^{c)}
Magnesiumsulfat	1,2		- ^{c)}
Salze	0,4		- ^{c)}
Fermentationen	2.616,7	5.682,9 ^{a)}	8.299,6
Ernte Separator klein	604,9	448,0	1.052,9
Ernte Separator groß	190,6	448,0	638,6
Zellaufschluss	140,7		140,7
Lösung I	2,2		- ^{c)}
Lösung II	1,5		- ^{c)}
Filtration Keramik	43,9	511,9 ^{b)}	555,8
Sprühtrockner	38,8		38,8
SIP/CIP Keramik		25,7 ^{d)}	25,7 ^{d)}

a) Wärmemengen Vorfermenter, Hauptfermenter, Abkühlen Ferm.-lösung, Abkühlen nach Fermentation

b) Wärmemenge F1 Keramikmodul, Abkühlen nach Herstellung Urea1

c) Wärmemenge durch Rühren & Pumpen muss bei Vorratsbehältern nicht abgeführt werden, weil zu gering

d) Energiemenge zum Abkühlen bei SIP/CIP wird zu 80% zum Erwärmen der CIP-Lösung verwendet, weswegen nur 20% der berechneten Kühlleistung berücksichtigt werden

5.1.4 Zusammenfassung der Anlagenauslegung

Die Daten für den biotechnologischen Herstellungsprozess des rekombinanten Spinnenseidenproteins wurden entsprechend des Forschungsstandes 2013 basierend auf dem Laborprozess hochskaliert und auf den Produktionsmaßstab mit einer Hauptfermentation von 100 m³ und anschließender Proteinreinigung in 5 m³ Batchvolumina übertragen. Für diese Prozessgrößen wurde je nach Anforderung für jeden Prozessschritt das jeweilige Hauptequipment ausgewählt und die Größe der begleitenden Prozessbehälter bestimmt. Daraufhin konnten Material-, Volumen- und Abwasserströme jedes Prozessschritts berechnet, sowie die Medien zur Sterilisation und Reinigung des Equipments bestimmt werden. Zur Vervollständigung der Betrachtung wurden die notwendige elektrische und thermische Energie sowie die Kühlenergie für jeden Prozessschritt bestimmt. In Abbildung 31 ist in einem Prozessfließbild der geplanten Anlage, die Größe aller Prozessbehälter, sowie der Prozessfluss visualisiert.

In Tabelle 28 sind die Ausbeuten der einzelnen Reinigungsschritte und die daraus resultierende Ausbeute der Proteinreinigung angegeben. Die unterschiedlichen Werte der Ausbeute der „Filtration Gesamt“ ergaben sich durch die Variation der Rückhaltung des Zielproteins bei allen Filtrationsschritten – eine angenommene Rückhaltung von 99,5% resultiert in einer Ausbeute von 90,9%, eine Rückhaltung von 98,0% in einer Ausbeute von 68,4% und eine Rückhaltung von 95,0% in einer Ausbeute von 38,7% (siehe auch Tabelle 5, Seite 65). Diese Variation der Ausbeute pro Prozessschritt resultiert wiederum in einer Variation der Ausbeute der gesamten Proteinreinigung von 86, 64 und 36%.

Tabelle 28: Ausbeute der Proteinreinigung

Prozessschritt	Ausbeute		
Ernte	98,0%		
Zellaufschluss	95,0%		
Filtration Gesamt	90,9%	68,4%	38,7%
Ausbeute Reinigung	86%	64%	36%

In Tabelle 29 ist die Menge an Spinnenseide in Abhängigkeit von der bei der Fermentation gebildeten Mengen an Spinnenseidenprotein und der resultierenden Ausbeute bei der Proteinreinigung unter Berücksichtigung der Variation der Rückhaltung des Spinnenseidenproteins bei der Filtration dargestellt.

Tabelle 29: Zusammenhang Ausbeute Fermentation und Ausbeute Reinigung

Ausbeute Fermentation	Ausbeute Reinigung		
	86%	64%	36%
5 g/l	21,7 kg	16,3 kg	9,2 kg
10 g/l	43,4 kg	32,6 kg	18,4 kg
15 g/l	65,1 kg	48,9 kg	27,7 kg

Bei einer Ausbeute von 5 g/l Spinnenseidenprotein berechnete sich eine Gesamtmenge von 506 kg Spinnenseide aus einer 100 m³ Fermentation. Aus einer 100 m³ Fermentation berechnet sich nach Durchführung aller Reinigungsschritte, mit einer Gesamtausbeute von 86% der bei der Fermentation produzierte Spinnenseide, eine Gesamtmenge von 435 kg gereinigtem Spinnenseidenprotein.

Für eine Sensitivitätsanalyse, d.h. die Analyse des Einflusses bestimmter Materialien und Energien auf das Gesamtergebnis, wurde eine Abschätzung der Genauigkeit jedes berechneten Wertes notwendig. In Tabelle 30 sind die geschätzten mittleren Abweichungen der Materialien und Energien aufgeführt.

Tabelle 30: Abgeschätzte Genauigkeit der Werte der Anlagenplanung

Energien	Geschätzte mittlere Abweichung
Energie, elektrisch	±15%
Energie, thermisch	±5%
Kühlenergie	±8,3%

Materialien pro Prozessschritt	Geschätzte mittlere Abweichung
Fermentation	±20%
Ernte	±5%
Zellaufschluss	-
Filtration	±20%
SIP/CIP	±5%
Sprühtrocknung	-

Die in diesem Kapitel durchgeführte Anlagenplanung beruht auf anerkannten Methoden zur Abschätzung von Investitionskosten für Produktionsanlagen in der Biotechnologie und entspricht dabei im Detaillierungsgrad eher der Planungsstufe einer Detailstudie, als einer ungenaueren Vorstudie. Der Präzisionsgrad wurde deswegen im Schnitt auf 15% bis 10% geschätzt^{135,136}. 30% des Bedarfs an elektrischer Energie resultierten aus der Berechnung des Verbrauchs von elektrischen Geräten, bei denen die Annahme getroffen wurde, dass durchschnittlich 70% der notwendigen Anschlussleistung im Betrieb anfällt, sowie aus der geplanten Einsatzdauer. Die übrigen 70% des Bedarfs an elektrischer Energie resultierten aus der Berechnung der notwendigen Rührleistung des Fermenters. Die Genauigkeit der Abschätzung des Verbrauchs der elektrischen Energie wurde wegen des Detaillierungsgrads der Planungsstufe auf 15% geschätzt. Der Bedarf an thermischer Energie wurde über die zuzuführenden Wärmemengen berechnet und wird, mit 5% Abweichung, als relativ genau geschätzt. Der Bedarf an Kühlenergie summierte sich aus abzuführender Wärmeenergie zum aktiven Kühlen auf ein niedrigeres Temperaturniveau, und zum Ausgleichen erzeugter Wärme durch mechanische Kräfte, wie z.B. Rühren, die in direkter Abhängigkeit zur eingebrachten elektrischen

Energie stehen. Die Genauigkeit der Abschätzung der Kühlenergie berechnete sich aus der Genauigkeit für elektrische und thermische Energie zu 8,3%.

Die Berechnung der Materialflüsse orientierte sich mit ihrem Präzisionsgrad zum Teil an der Anlagenauslegung und im Weiteren an denen von AmSilk zur Verfügung gestellten Daten. Basierend darauf wurde die Genauigkeit jedes Prozessschritts abgeschätzt. Die Fermentation und die Filtration wurden mit 20% am ungenauesten geschätzt, Ernte und SIP/CIP mit 5% als relativ genau. Bei Zellaufschluss und Sprühtrocknung entsteht kein Materialverbrauch und dadurch resultierte auch keine Abschätzung einer Genauigkeit. Die angenommene Ungenauigkeit bei der Fermentation basierte auf der linearen Hochrechnung der Materialflüsse der Laborfermentation auf die 100 m³ Fermentation in Kombination mit Literaturdaten. Die Ungenauigkeit der Filtration beruhte auf der vollständigen Berechnung mit Literaturdaten. Es wird jedoch angenommen, dass der Materialbedarf eher als systematisch zu hoch, als zu niedrig eingeschätzt wurde und in einer realen Prozessanlage optimiert werden könnte.

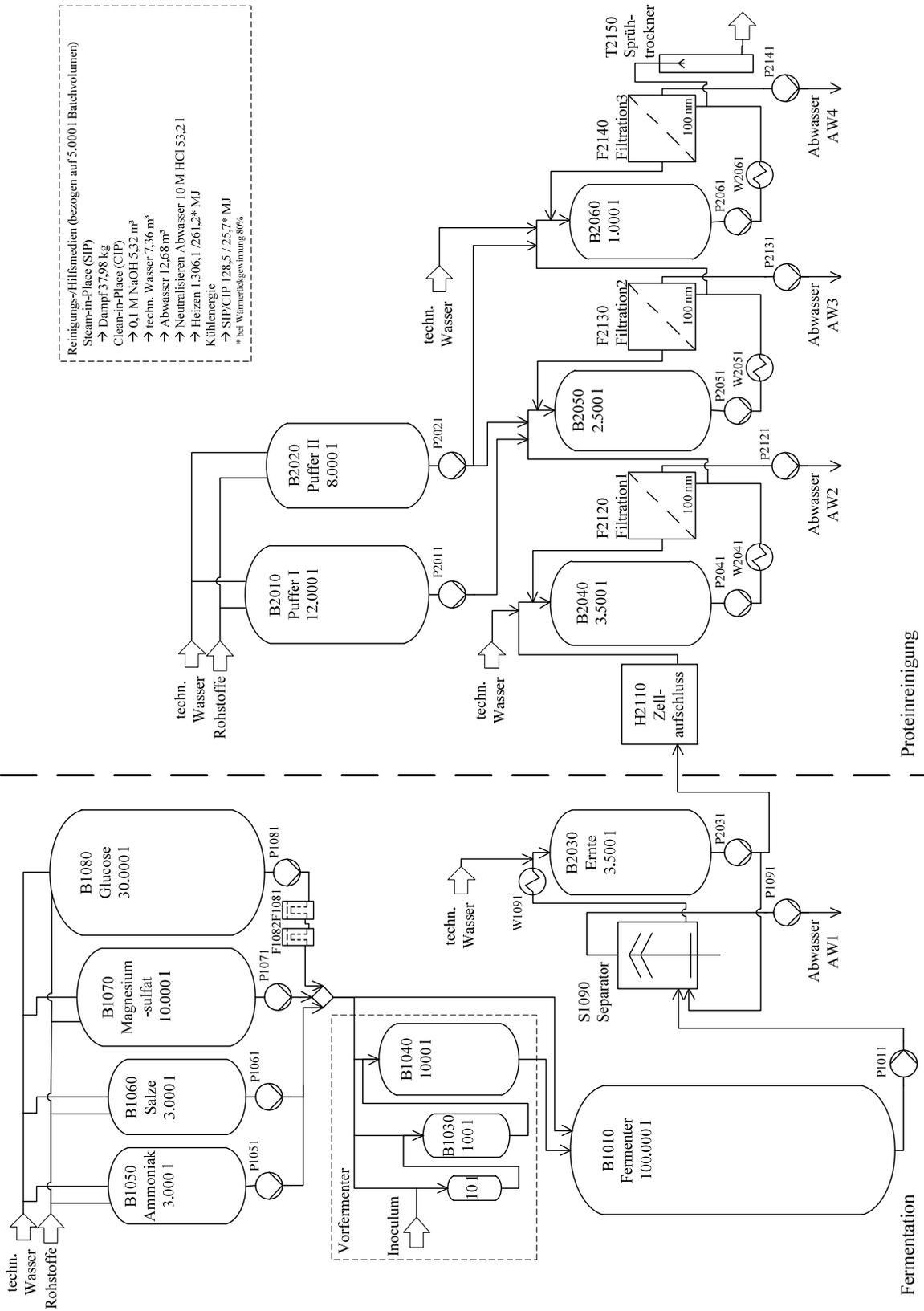


Abbildung 31: Prozessflussbild der Prozessauslegung

5.2 Spinnenseide in der Anwendung als Submikrogewebe in einem Staubbeutel

Die Herstellung von Spinnenseiden-Submikrogewebe war zum Zeitpunkt der praktischen Arbeiten dieser Dissertation nur im Labormaßstab möglich. Die Datenerhebung für die ökobilanzielle Betrachtung wurde ausgehend vom Labormaßstab für ein Submikrofilter-Gewebe vorgenommen. Im Labormaßstab wurden die im Prozess notwendigen Lösungsmittel nicht zurückgewonnen. Für einen industriellen Maßstab wäre das aus Kosten- und Umweltaspekten zwingend erforderlich, weswegen die Energien zur Rückgewinnung der Lösemittel in der Betrachtung berücksichtigt wurden, jedoch ohne Berücksichtigung des Verlusts von Lösemitteln während des Einsatzes und der Rückgewinnung.

In Abbildung 32 ist der Staubbeutel und der Filteraufbau abgebildet, der zusammen mit Kooperationspartnern entwickelt wurde (Kapitel 4) und als Grundlage der hier durchgeführten ökobilanziellen Betrachtung diente.

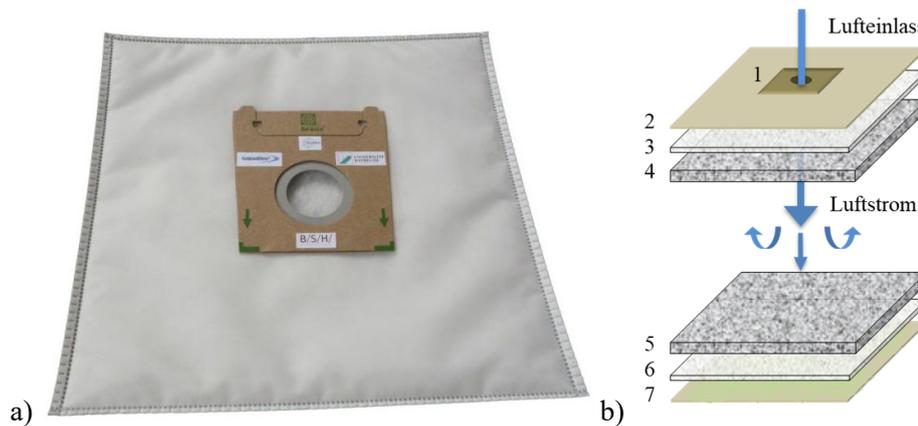


Abbildung 32: Staubbeutel mit Spinnenseiden-Submikrogewebe¹³⁷

- a) Demonstrationsmodell erstellt mit industriellen Kooperationspartnern
- b) Schematischer Aufbau des Demonstrationsmodells: 1 = Verbindungsstutzen und Lufteinlass, 2 & 7 = Polyamid-Gewebe mit Spinnenseidenprotein-Submikrogewebe, 3 & 5 = Polypropylen-Spinnvlies, 4 & 5 = Polyester-Stapelvlies

Ein Staubbeutel nach Stand der Technik ist aus drei Materiallagen aufgebaut – einer Lage Spinnvlies (*Spunbond*) aus z.B. Polypropylen, einer dicken Lage schmelzgeblasenem Vlies (*Melt-Blown*) und einer Lage Stapelvlies aus z.B. Polyester. Der Staubbeutel mit Spinnenseiden-Submikrogewebe besitzt anstatt der Lage Spinnvlies eine Lage Polyamid-Gewebe auf dem das Spinnenseiden-Submikrogewebe aufgebracht wurde (siehe Abbildung 32b, Lage 2 & 7), statt der dicken Schicht schmelzgeblasenem Vlies, eine geringere Schicht schmelzgeblasenem Vlies (siehe Abbildung 32b, Lage 3 & 6) und, analog einem Filter nach Stand der Technik, eine Lage Polyester-Stapelvlies (siehe Abbildung 32b, Lage 4 & 5). Das Spinnenseiden-Submikrogewebe wurde durch Elektrospinning auf die Polyamid-Filterlage aufgebracht. Durch die Verwendung des Spinnenseiden-Submikrogewebes ergab sich eine erhebli-

che Materialeinsparung, da von dem Melt-Blown-Vlies zum Erreichen der gleichen Filterleistung weit mehr Material notwendig wäre. Die Einsparung eines Teils der Melt-Blown-Schicht von 50 bis 60 g pro Filter konnte als Orientierungspunkt herangezogen werden¹³⁸. Für die Vergleichbarkeit und als Vereinfachung der ökobilanziellen Betrachtung wurde für den Staubbeutel mit Spinnenseiden-Submikrogewebe auch eine Spinnvlieslage anstatt der Lage Polyamid-Gewebe für die Betrachtung angenommen.

5.2.1 Untersuchungsrahmen des Spinnenseiden-Submikrogewebes

In Abbildung 33 ist eine allgemeine Beschreibung der Herstellung und des Einsatzes eines Staubbeutels in einem Staubsauger abgebildet. Die Herstellung der Rohstoffe für die Filterlagen, die Produktion der einzelnen Filterlagen, deren Verarbeitung zu einem Staubbeutel und dessen Einsatz im Staubsauger mussten für die Betrachtung des gesamten Lebensweges berücksichtigt werden. Abschließend mussten die Aufwendungen zur Entsorgung des Filterbeutelmaterials nach dem Produkteinsatz einbezogen werden.

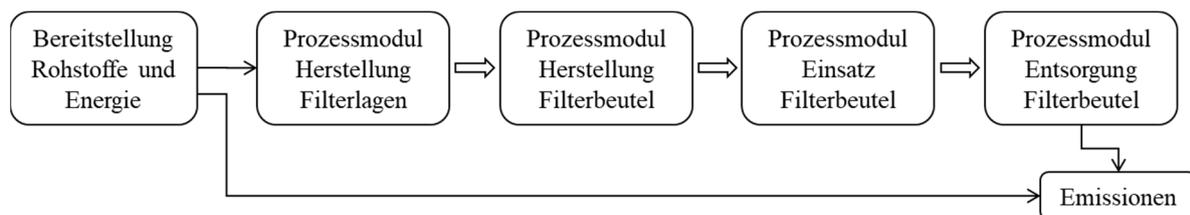


Abbildung 33: Systemflussbild der Herstellung eines Filterbeutels „cradle-to-grave“

In Abbildung 34 ist das für die angestrebte ökobilanzielle Betrachtung zu berücksichtigende System abgebildet. Da das Umweltentlastungspotential des Seidengewebes im Staubbeutel untersucht werden sollte, mussten für die Betrachtung nur die zusätzlichen Aufwendungen zur Herstellung des Spinnenseidenproteins (1), dessen Verarbeitung zum Gewebe (2), die Energieeinsparung im Filtereinsatz (3) und die Einsparung an üblicherweise im Staubbeutel verwendeten Filtermaterial (6) berücksichtigt werden. Es wurde angenommen, dass bei der Konfektionierung des Filterbeutels (3) keine zusätzlichen Aufwendungen notwendig sind, da das Spinnenseidengewebe durch Elektrospinning auf eine andere Filterlage aufgebracht werden würde. Für die Entsorgung (5) wurde das Modul „Entsorgung Bioabfall in Kehrichtverbrennung“ angesetzt, da bei dem hier betrachteten Staubbeutel das Seidenfiltergewebe mit dem restlichen Staubbeutel in den Hausmüll entsorgt werden würde (der Inhalt eines Staubbeutels muss über den Restmüll entsorgt werden¹³⁸).

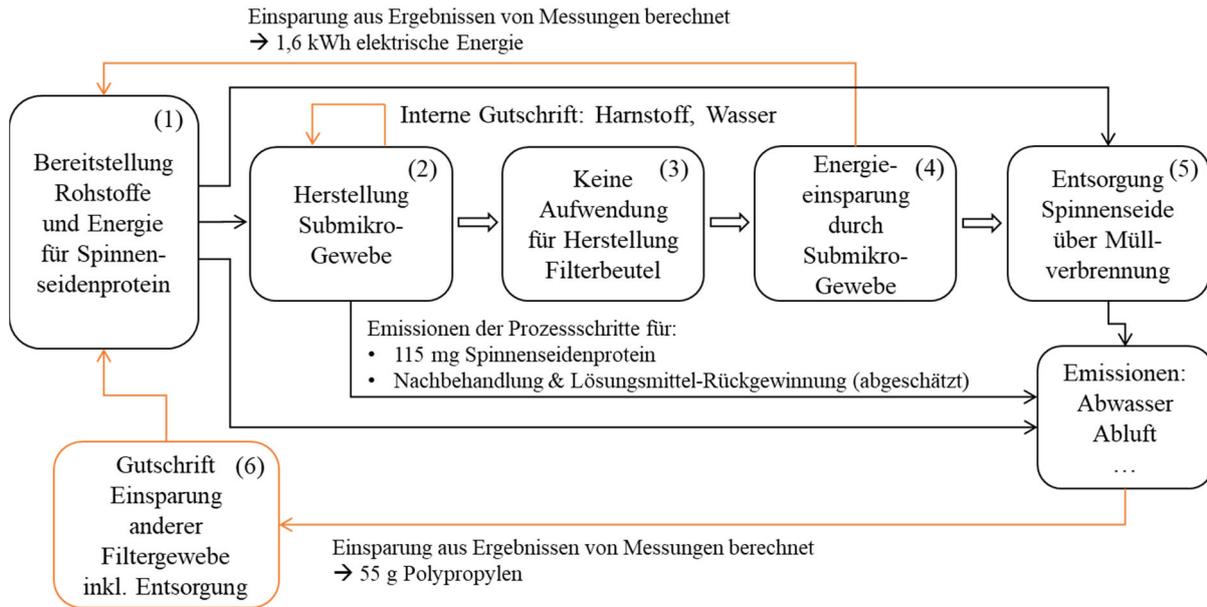


Abbildung 34: Systemfließbild der für die Betrachtung des Seidenfiltergewebes notwendigen Module „cradle-to-grave“

5.2.2 Elektrospinning zur Erzeugung des Submikrogewebes

Die Herstellung des Submikrofiltergewebe wurde mittels Elektrospinning, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, angenommen. Dafür würde das gereinigte Spinnenseidenprotein zu 10% in HFIP (100 mg/ml) gelöst und so eine Spinnlösung hergestellt. Die Kanüle der mit Spinnenseidenlösung gefüllten Spritze würde an die Elektrode der Elektrospinning-Apparatur angeschlossen. Durch Anlegen der Hochspannung und Starten des Proteinlösung-Volumenstroms würden sich von der Spitze der Kanüle Submikrofasern im elektrischen Feld ablösen und würden in Richtung der Gegenelektrode gezogen werden. Auf dem Trägermaterial, das auf dem Kollektor befestigt ist, würden sich die elektrogewebenen Fäden ablegen und das Submikrogewebe bilden.

Bei einer Konzentration von 100 mg/ml Spinnenseide in HFIP wären zum Lösen von 115 mg Spinnenseide insgesamt 1,15 ml HFIP zur Herstellung des Submikrogewebes notwendig. Bei einer Dichte von 1.518 kg/m³ entspräche dies einer Menge von 1,75 g HFIP¹³⁹. Das minimale Raumvolumen, das notwendig wäre, damit HFIP vollständig verdampft, betrüge 0,0015 m³ (Berechnung nach Formel 25 und Formel 25a). Die Elektrospinn-Kammer wurde als wesentlich größer angenommen um das Verdampfen des HFIP sicherzustellen.

$$m_{\text{Lösungsmittel}} = M_{\text{Lösungsmittel}} \cdot \frac{V_{\text{Kammer}}}{V_{m,20C}} \cdot \frac{p_{\text{Lösungsmittel}}}{p_o} \tag{Formel 25}$$

V_{Kammer} Raumvolumen zum Verdampfen [m³]

$m_{\text{Lösungsmittel}}$ Masse des Lösungsmittels [g]

$M_{\text{Lösungsmittel}}$ Molmasse des Lösungsmittels [g/mol]

$V_{m,20^{\circ}C}$	Molares Volumen bei Normalbedingungen (20 °C) 22,4 l/mol
p_o	Normaldruck 1.013 mbar
$p_{Lösungsmittel}$	Partialdruck des Lösungsmittels [mbar]

$$V_{min} = \frac{m_{HFIP}}{M_{HFIP}} \cdot V_{m,20^{\circ}C} \cdot \frac{p_o}{p_{HFIP}} \quad \text{Formel 25a}$$

V_{min}	Minimales Raumvolumen zum Verdampfen [m ³]
m_{HFIP}	Masse an HFIP [g]
M_{HFIP}	Molmasse HFIP [g/mol]
p_{HFIP}	Partialdruck HFIP [mbar]

$$V_{min} = \frac{m_{HFIP}}{M_{HFIP}} \cdot V_{m,20^{\circ}C} \cdot \frac{p_o}{p_{HFIP}} = \frac{1,75 \text{ g}}{168,04 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \cdot \frac{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}}{1000 \frac{\text{l}}{\text{m}^3}} \cdot \frac{1.013 \text{ mbar}}{160 \text{ mbar}} = 0,0015 \text{ m}^3$$

Das verwendete Lösungsmittel sollte mit einer Kühlfalle zurückgewonnen werden. Die dafür notwendige Energie berechnete sich aus der Energie, die zum Abkühlen des HFIPs von Raumtemperatur bis zu 0 °C notwendig war und der Energie zum Kondensieren des HFIPs¹³⁹.

$$\Delta Q_{Abkühlen HFIP} = c_{p,flüssig} \cdot m \cdot (20^{\circ}C - 0^{\circ}C) + \Delta_v H_0 \cdot m \quad \text{Formel 26}$$

ΔQ	Wärmemenge [kJ]
$c_{p,flüssig}$	spezifische Wärmekapazität $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right]$
m	Masse des zu erwärmenden Stoffes [g]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
$\Delta_v H_0$	Verdampfungsenthalpie [kJ]

$$\Delta Q_{Abkühlen HFIP} = 1,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 20 \text{ K} + 270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 0,52 \text{ kJ}$$

Zur Herstellung des hier betrachteten Filters würde eine Grundfläche von 26 cm x 26 cm, d.h. 0,07 m² benötigt (im Weiteren wurde mit einer Fläche von 0,1 m² gerechnet) – für einen Filter würden insgesamt zwei Lagen benötigt. Mit den eingesetzten Spinnparametern zum Erzeugen eines funktionsfähigen Submikrofiltergewebes würden ca. 115 mg Spinnenseide verbraucht. Der dafür notwendige Strom würde mit den Angaben zum industriellen Elektrosponning der Firma Mann + Hummel GmbH (0,015 kWh/m²) aus dem UBA-Text 34/2010⁴⁵ abgeschätzt und betrug 0,003 kWh, bzw. 5,4 kJ.

Die notwendige Menge an Isopropanol für die Nachbehandlung der Spinnenseide bei einem Raumvolumen der Nachbehandlungskammer von 0,2 m³ wurde nach Formel 25b berechnet:

$$m_{Isoprop} = M_{Isoprop} \cdot \frac{V_{Kammer}}{V_{0,60^{\circ}C}} \cdot \frac{p_{Isoprop}}{p_o} \quad \text{Formel 25b}$$

$m_{Isoprop}$	Masse Isopropanol [g]
$M_{Isoprop}$	Molare Masse Isopropanol [g/mol]
V_{Kammer}	Volumen der Nachbehandlungskammer [m ³]
$V_{m,60^{\circ}C}$	Molares Volumen bei 60 °C
$p_{Isoprop}$	Partialdruck Isopropanol
p_o	Normaldruck 1.013 mbar

$$m_{Isoprop} = 60,1 \frac{g}{mol} \cdot \frac{0,02 m^3 \cdot 1000 \frac{l}{m^3}}{27,3 \frac{l}{mol}} \cdot \frac{384 mbar}{1013 mbar} = 16,7 g$$

Mit den spezifischen Wärmekapazitäten und Dichten für Luft und Isopropanol berechnete sich bei einer Temperaturerhöhung von 20 auf 60 °C die benötigte Energiemenge nach Formel 27 von 2,5 kJ. Zur Vereinfachung der Berechnung wurden die jeweils höheren Werte der Wärmekapazität und Dichte für die Berechnung verwendet^{140,141}.

$$\Delta Q = c_{p,flüssig} \cdot m \cdot (T_{Ende} - T_{Anfang}) = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T \quad \text{Formel 27}$$

ΔQ	Wärmemenge [kJ]
$c_{p,flüssig}$	spezifische Wärmekapazität $\left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$
m	Masse des zu erwärmenden Stoffes [g]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]

$$\Delta Q_{Aufwärmen Luft} = c_p \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta T = 1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 0,65 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,02 m^3 \cdot 40 K = 0,5 kJ$$

$$\Delta Q_{Aufwärmen Isopropanol} = 3,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 16,7 \cdot 10^{-3} kg \cdot 40 K = 2,0 kJ$$

Zur Abschätzung des Wärmeverlusts während der Nachhandlung wurde die Außenfläche nur anteilig berechnet, da bei einem Prozess im industriellen Maßstab die hier betrachtete Filterfläche nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche ausmachen würde. Für 0,1 m² Filterfläche würde eine Nachbehandlungskammer mit den Abmessung 0,316 m Länge und 0,2 m benötigt werden. Für die Berechnung wurde deshalb 1/10 der berechneten Außenfläche der 0,25 m²

großen Nachbehandlungskammer herangezogen, was zu einer zu berücksichtigenden Außenfläche von $0,025 \text{ m}^2$ führt. Es wurde der Wärmedurchgangskoeffizient für einen Kammeraufbau mit einem $0,2 \text{ cm}$ dickem Stahlgehäuse (Wärmeleitfähigkeit $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) und einer 10 cm dicken Styropor-Isolierschicht (Wärmeleitfähigkeit $0,04 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) angenommen. Es ergab sich ein Gesamtwärmedurchgangskoeffizient von $0,37 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (Berechnung nach Formel 28). Die Erwärmung der Nachbehandlungskammer selbst wurde bei der Abschätzung des Wärmeverlusts vernachlässigt.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{se}} \quad \text{Formel 28}$$

U	„U-Wert“ entspricht dem Wärmedurchgangskoeffizient " k " $[\frac{W}{m^2\cdot K}]$
R_T	Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2\cdot K}{W}]$ für ein ebenes Bauteil aus thermisch homogenen Schichten
R_{si}	innerer Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2\cdot K}{W}]$
R_i	Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2\cdot K}{W}]$ einer Schicht: $R_i = \frac{d_i}{\lambda_i}; i = 1$
R_{se}	äußerer Wärmedurchlasswiderstand $[\frac{m^2\cdot K}{W}]$
d_i	Dicke einer Schicht im Bauteil $[m]$
λ_i	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes $[\frac{W}{m\cdot K}]$

Der Wärmeverlust für zwei Stunden Nachbehandlung bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Umgebungstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ berechnete sich zu $0,74 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$, d.h. $2,67 \text{ kJ}$ nach Formel 29. Das Aufheizen der Nachbehandlungskammer und das Halten der Temperatur wurden in Summe mit $5,2 \text{ kJ}$ berücksichtigt.

$$\dot{Q} = k_W \cdot \Delta T \cdot A \cdot \Delta t \quad \text{Formel 29}$$

Q	Wärmeverlust $[kWh]$
k_W	Wärmedurchgangskoeffizient $[\frac{W}{m^2\cdot K}]$
ΔT	Temperaturdifferenz innen zu außen $[K]$
A	Oberfläche $[m^2]$
Δt	Dauer des Wärmeverlusts $[t]$

$$\dot{Q} = k_W \cdot \Delta T \cdot A \cdot \Delta t = 0,37 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 40 \text{ K} \cdot 0,025 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ h} = 0,74 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} = 2,67 \text{ kJ}$$

Für die industrielle Produktion wurde angenommen, dass das Isopropanol für die Nachbehandlung abgesaugt und wiederverwendet werden würde. Zum Absaugen des Isopropanols wurde der Energieverbrauch mit den Angaben einer Lösemittel-Absaugeinrichtung abgeschätzt (Airmaster 1200, Kaweha Anlagentechnik GmbH)¹⁴². Mit der angegebenen maximalen Motorleistung von 0,75 kW für 0,7 m² Absaugefläche berechnete sich der Energieverbrauch bei 20 s Absaugungsdauer pro 0,1 m² Filterfläche mit Formel 11 zu 1,5 kJ:

$$E_{\text{Absaugung}} = P \cdot t \cdot 0,7 = 0,75 \text{ kW} \cdot \frac{0,1 \text{ m}^2}{0,7 \text{ m}^2} \cdot 20 \text{ s} \cdot 0,7 = 0,42 \cdot 10^{-3} \text{ kWh} = 1,5 \text{ kJ}$$

Das berechnete Luftvolumen zum Absaugen betrug bei einem Volumenstrom von 1.000 m³/h bei 20 s Laufzeit 5,6 m³. Das führte bei 16,7 g Isopropanol, die in 20 s abgesaugt werden würden, zu einem Isopropanol-Volumenstrom von 3,0 g/m³, der durch Aktivkohle absorbiert werden sollte.

Die in der Lösemittel-Absaugeinrichtung verwendete Aktivkohle kann bei einem Isopropanol-Volumenstrom von 3,0 g/m³ zu ca. 23% beladen werden¹⁴³. Man benötigte deshalb zum Abtrennen von 16,7 g Isopropanol 72,6 g Aktivkohle. Zur Regenerierung wurde angenommen, dass die Aktivkohle mit Heißgas (Stickstoff) bei 160 °C überströmt und das Isopropanol bis auf ca. 3,3% vom Adsorber desorbiert werden würde. Die Berechnung wurde im folgenden auf 1 kg Aktivkohle bezogen^{144,145}, verwendet wurde Formel 27:

$$\Delta Q_{\text{Aufwärmen Aktivkohle}} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ kg} \cdot 140 \text{ K} = 117,6 \text{ kJ}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{Aufwärmen Isoprop}} &= c_{p,\text{flüssig}} \cdot m \cdot (82 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) + \Delta_v H_0 \cdot m + c_{p,\text{gasförmig}} \cdot m \cdot (160 \text{ °C} - 82 \text{ °C}) \\ &= 3,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,23 \text{ kg} \cdot 62 \text{ K} + 656,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 0,23 \text{ kg} + 2,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 0,23 \text{ kg} \cdot 78 \text{ K} = 229,5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Das Heißgas musste genauso viel Energie transportieren, wie zum Erhitzen des Adsorbers und des darin gebundenen Isopropanols notwendig war, somit konnte das Volumen des Trägergases aus dieser Energiemenge unter Verwendung von Formel 27 berechnet werden¹⁴⁶:

$$V_{\text{Trägergas N}_2} = \frac{\Delta Q_{\text{Aufwärmen Trägergas N}_2}}{c_p \cdot \rho \cdot \Delta T} = \frac{229,5 \text{ kJ}}{1,04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,14 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 140 \text{ K}} = 2,1 \text{ m}^3$$

Es ergab sich pro kg Aktivkohle eine notwendige Heizleistung von 347,1 kJ. Zum anschließenden Abkühlen der Aktivkohle und zum Kondensieren des Isopropanols im Trägerstrom wurde die gleiche Energiemenge an Kühlenergie von 347,1 kJ angenommen. Zur Berücksich-

tigung der beim Prozessschritt der Reaktivierung der Aktivkohle und Rückgewinnung des Isopropanols benötigten Pumpleistung wurde ein Strombedarf von 10 kJ pro kg Aktivkohle angesetzt.

5.2.3 Spinnenseiden-Submikrogewebe im Staubbeutel

Es wurden Filter mit Spinnenseiden-Submikrogewebe im Vergleich zu einem Serien-Staubbeutel vermessen. Aus diesen Messungen konnte ein erhöhter Luft-Volumenstrom von 4,72 dm³/s zum Volumenstrom des Serien-Staubbeutels von 33,85 dm³/s abgeleitet werden. Bei einem Staubsauger mit 1.500 W Anschlussleistung verringerte sich durch den erhöhten Volumenstrom die notwendige Leistung um ca. 200 W.

Ein Staubbeutel sollte ungefähr alle zwei Monate ausgewechselt werden, um zu verhindern, dass Schimmel entsteht und sich Bakterien vermehren können¹⁴⁷. Die durchschnittliche Nutzungsdauer beträgt eine Stunde pro Woche. Aufgrund dessen sollte der Staubbeutel nach ungefähr acht Betriebsstunden erneuert werden³². Bei einer durchschnittlichen Einsatzdauer von 8 Stunden pro Filterbeutel ergab sich mit der oben berechneten geringeren Leistungsaufnahme eine Einsparung von 1,6 kWh, bzw. 5.760 kJ pro Filterbeutel.

5.3 Zusammenfassung der Datenerhebung

Mit den Werten der Anlagenauslegung der Herstellung der Spinnenseide und der Erhebung der Daten für den Einsatz der Spinnenseide als Submikrogewebe in einem Filterbeutel wurden alle Materialflüsse, sowie der Bedarf an Energien und Prozessmedien gesammelt, um in einem weiteren Schritt die Module in Umberto anzulegen (Beschreibung in Kapitel 6) und die Betrachtung der Nachhaltigkeit durchzuführen (Beschreibung in Kapitel 7).

6 MODELLIERUNG IN UMBERTO

Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, die Vorgaben der ISO 14040 und 14044 zu berücksichtigen, damit eine spätere Veröffentlichung der Studie durch AmSilk nach Durchführung eines *Critical Review* möglich wäre. Abweichungen von den Vorgaben sind dokumentiert.

Die Untersuchung sollte einerseits die Möglichkeit der Prozessanalyse bieten, um frühzeitig im Entwicklungsprozess der Herstellung der Spinnenseide im Produktionsmaßstab ökologisch relevante Faktoren abschätzen zu können, andererseits sollte das Umweltentlastungspotential einer konkreten, schon entwickelten Anwendung untersucht werden, sowie weitere potentielle Anwendungsgebiete mit den Resultaten der durchgeführten Studie beurteilt werden.

Folgende Eckpunkte kennzeichnen die durchgeführte Studie:

- Es wurde eine ökobilanzielle Betrachtung in Anlehnung an ISO 14040 durchgeführt (vereinfachte Ökobilanz)².
- Im ersten Schritt wurde die großtechnische, biotechnologische Herstellung eines künstlichen Spinnenseidenproteins als Ausgangsmaterial für technische Anwendungen untersucht.
 - Die Herstellung aller Rohstoffe und Energien zur Erzeugung des Spinnenseidenproteins, sowie die Entsorgung des anfallenden Abwassers wurden betrachtet.
 - Die Betrachtung wurde als „cradle-to-factory-gate“ – von der Wiege bis zum Fabrikator – durchgeführt.
 - Die funktionelle Einheit war bei dieser Betrachtung 1 kg Spinnenseide.
- Als eine konkrete Einsatzmöglichkeit der Spinnenseide wurde ein Submikrofilter mit Einsatz als Staubbeutel in einem Staubsauger verglichen mit einem Staubbeutel nach Stand der Technik ohne Submikrofiltergewebe.
 - die Verarbeitung der Spinnenseide durch Elektrosponning zu einem Filtergewebe, die Material- und Energieeinsparung während des Betriebs im Vergleich zu einem Staubbeutel ohne Submikrofilter, und die Entsorgung der Spinnenseide am Ende des Produkteinsatzes wurden betrachtet.
 - Die Analyse wurde als „cradle-to-grave“ – von der Wiege bis zur Bahre – durchgeführt.
 - Die funktionelle Einheit war ein Staubbeutel mit biotechnologisch erzeugtem Spinnenseidenprotein mit einer für den angestrebten Anwendungsbereich ausreichenden Reinheit.

- Für alle Betrachtungen war die geographische Systemgrenze Deutschland mit der durch den internationalen Handel, v.a. innerhalb der EU, bedingten notwendigen Ausweitung für Zwischenprodukte und Rohstoffe, Energieträger etc.^{nach 49, S.90}. Der Einsatz von Rohstoffen, die im Ausland (USA; sonstige Länder) hergestellt werden, führte partiell zu einer Ausweitung der Systemgrenzen.
- Der zeitliche Bezug ergab sich aus der Verfügbarkeit der Daten. Es wurden die Datensätze von ecoInvent 2.2 (2010) verwendet. Die verwendeten Datensätze für jeden Materialfluss sind im Anhang V enthalten.
- Ungleichheiten des betrachteten Systems wurden über Allokation durch Gutschriften gelöst^{50 S.44} und sind detailliert beschrieben.

6.1 Modellierung der Herstellung des Spinnenseidenproteins

6.1.1 Modellierung des Herstellungsprozesses

In Abbildung 35 ist eine Übersicht der Herstellung der Spinnenseide mit den notwendigen Material- und Energieströmen dargestellt. Da in Umberto oder ecoInvent keine Module für biotechnologische Prozesse vorhanden waren, musste die Herstellung der Spinnenseide vollständig neu in Umberto erstellt werden.

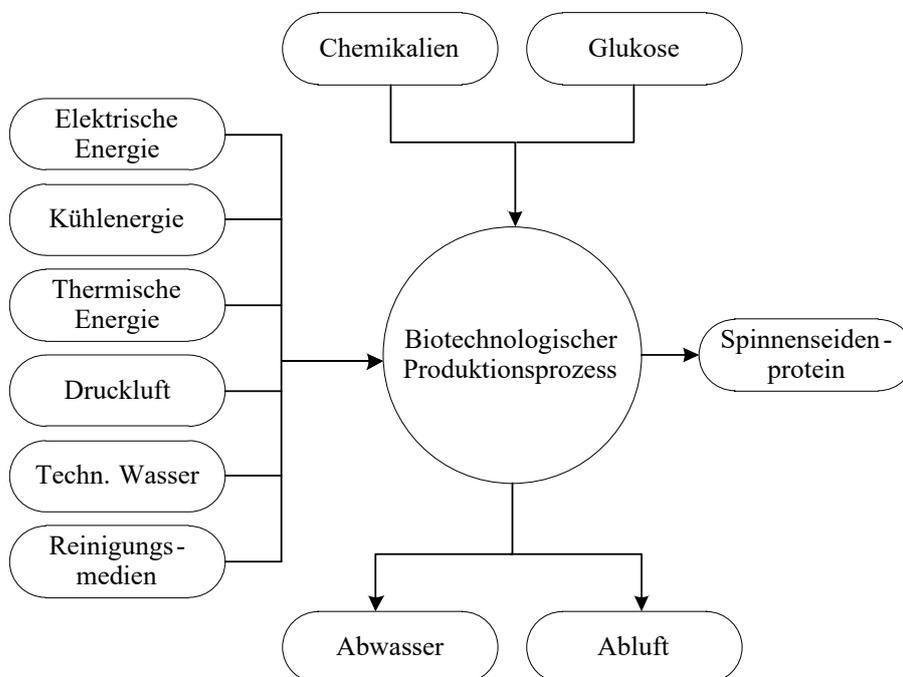


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Spinnenseide

In Abbildung 36 ist das Stoffstromnetz der Modellierung in Umberto abgebildet, um „1 kg getrocknetes Spinnenseidenprotein“ untersuchen zu können (pinker Pfeil). Um die Übersichtlichkeit der Modellierung zu erhöhen, wurden die erforderlichen Vorketten der im Prozess

benötigten Rohstoffe, Energien und Prozessmedien in einem, dem Herstellungsprozess vorgeschalteten Modul „Vorketten“, abgebildet (siehe Anhang U).

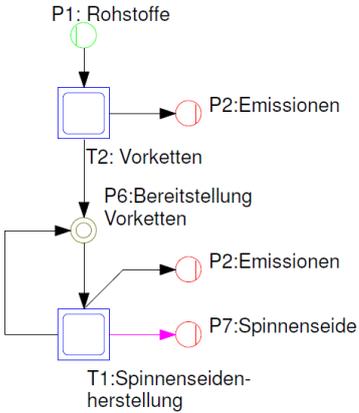


Abbildung 36: Stoffstromnetz der Herstellung der Spinnenseide
(Die Nummerierung der Module (Transition = T) und der Konnektoren (Place = P) ergab sich durch die zeitliche Abfolge, in der die Stellen in Umberto angelegt wurden und konnten nachträglich nicht geändert werden.)

In Abbildung 37 ist das Subnetz des Stoffstromnetzes der Herstellung der Spinnenseide abgebildet. Es setzt sich aus den Prozessschritten Fermentation, Ernte, Zellaufschluss, Filtration und Sprühtrocknen zusammen. Die Modellierung der Medienbereitstellung für die Fermentation (Abbildung 38), der Herstellung der Reinigungslösung für das CIP (Abbildung 39), der Herstellung der Hilfsstoffe für die Proteinreinigung (Abbildung 40) und die Abwasserbehandlung (Abbildung 41) wurde mit Subnetzen realisiert.

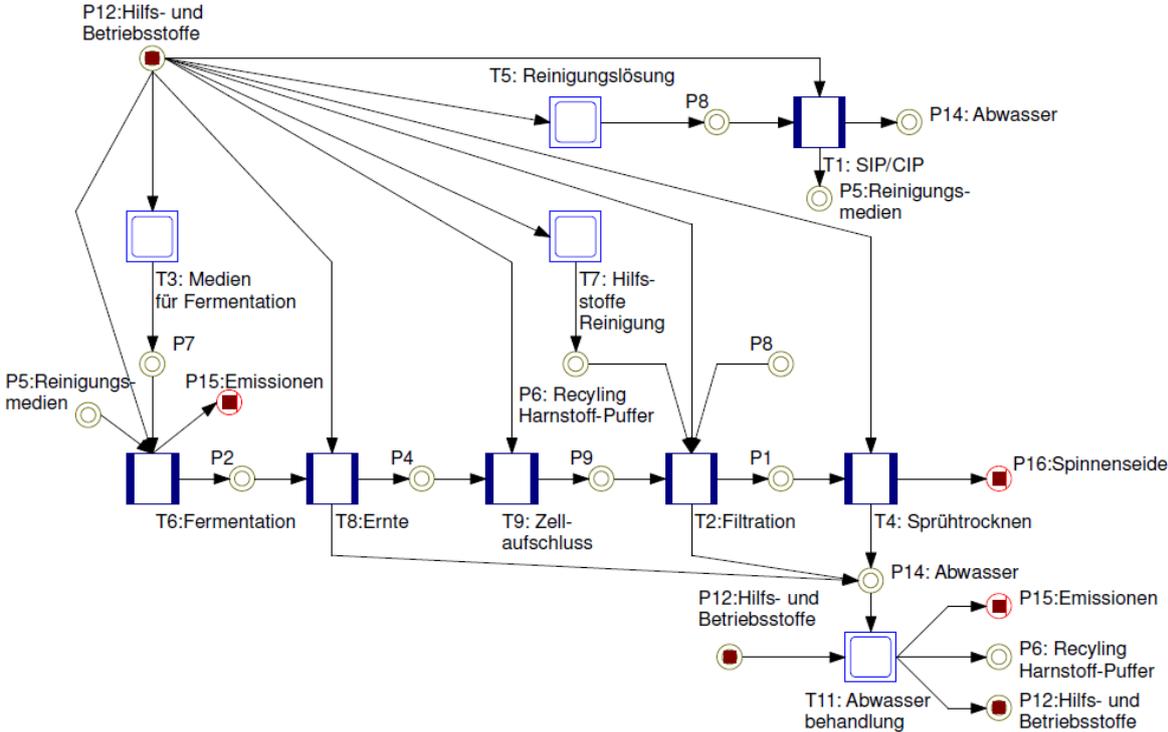


Abbildung 37: Subnetz der Herstellung der Spinnenseide

(T1 aus Abbildung 36)

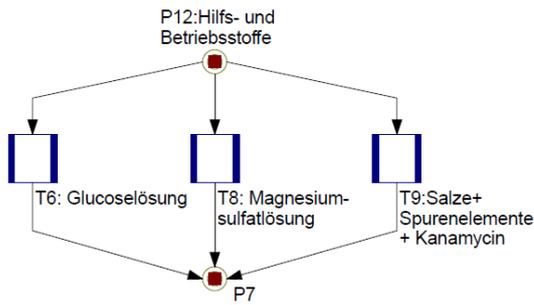


Abbildung 38: Subnetz der Medienbereitstellung für die Fermentation
(T3 aus Abbildung 37)

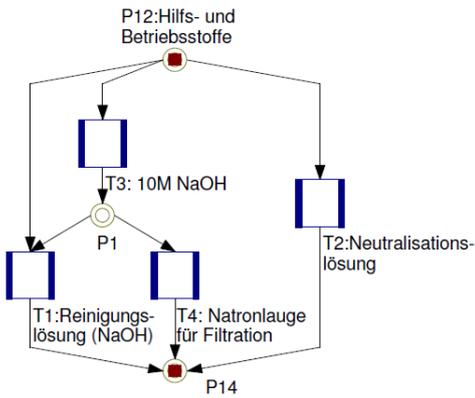


Abbildung 39: Subnetz der Herstellung der Reinigungslösung für CIP
(T5 aus Abbildung 37)

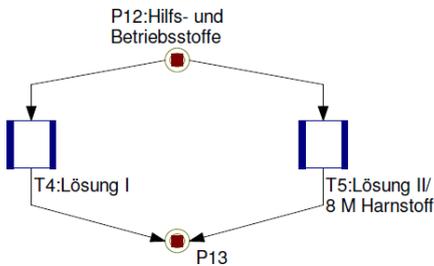


Abbildung 40: Subnetz der Herstellung der Lösungen für die Proteinreinigung
(T7 aus Abbildung 37)

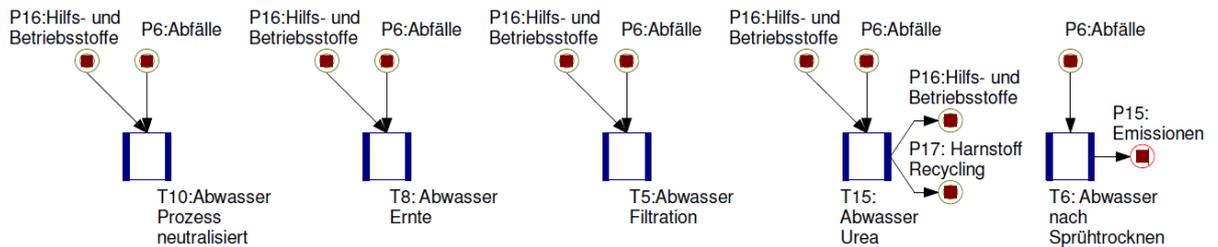


Abbildung 41: Subnetz der Abwasserbehandlung
(T11 aus Abbildung 37)

In Tabelle 31 sind die Bilanzparameter für alle Module des Spinnenseidenprozesses aufgeführt.

Tabelle 31: Bilanzparameter der Herstellung des rekombinanten Spinnenseidenproteins bezogen auf 5 m³ Fermentationsvolumen

Modul	Input	Output		
Fermentation	Glucoselösung	1,406 m ³	Zellmasse vor Ernte	5 m ³
	Magnesiumsulfatlösung	0,525 m ³	Kohlendioxid, biogen	490 kg
	Salze	0,140 m ³	[Luft/allg.]	
	Ammoniaklösung 25%	0,145 m ³		
	IPTG	0,867 kg		
	Energie, elektrisch	3.401,7 MJ		
	Energie, thermisch	223,8 MJ		
	Kühlenergie	8.299,6 MJ		
	Druckluft	1.189 Nm ³		
	Reinigung Equipment	1 unit		
Ernte Separator groß	Zellmasse vor Ernte	5 m ³	Zellmasse vor Aufschluss	3,5 m ³
	Wasser techn.	7 m ³	Abwasser Ernte	8,5 m ³
	Energie, elektrisch	247,8 MJ		
	Kühlenergie	638,6 MJ		
Zellaufschluss	Zellmasse vor Aufschluss	3,5 m ³	Zellmasse nach Aufschluss	3,5 m ³
	Energie, elektrisch	183,0 MJ		
	Kühlenergie	140,7 MJ		
Filtration Keramik-modul	Zellmasse nach Aufschluss	3,5 m ³	Retentat nach Filtration3	0,25 m ³
	Wasser techn.	9,491 m ³	Abwasser Filtration	14,172 m ³
	Lösung I	3,006 m ³	Abwasser Harnstoff	4.152 m ³
	Harnstoff	755,5 kg		
	Lösung II	2,004 m ³		
	Natronlauge 10M	12,5e-3 m ³		
	Neutralisationslösung	12,5e-3 m ³		
	Energie, elektrisch	57,0 MJ		
	Energie, thermisch	462,5 MJ		
	Kühlenergie	555,8 MJ		
Sprüh-trocknen	Retentat nach Filtration3	0,25 m ³	Getrocknetes Protein	21,7 kg
	Energie, elektrisch	50,4 MJ	Abwasser Sprühtrocknen	0,25 m ³
	Kühlenergie	38,8 MJ		
SIP/CIP-Reinigung Prozess (Keramik-Modul)	Reinigungslösung 1 (NaOH)	5,32 m ³	Reinigung Equipment	1 unit
	Neutralisationslösung	0,0532 m ³	Abwasser Prozess neutral.	12,68 m ³
	Wasser techn.	7,36 m ³		
	Dampf (kg)	37,98 kg		
	Energie, elektrisch	4,9 MJ		
	Energie, thermisch	261,2 MJ		
Kühlenergie	25,7 MJ			
Medienbereitstellung für die Fermentation				
Lösung Glucose	Glucose	409 kg	Glucoselösung	1 m ³
	Wasser, techn.	0,734 m ³		
	Energie, elektrisch	3,0 MJ		
Lösung Magnesiumsulfat	Magnesiumsulfat	200 kg	Magnesiumsulfatlösung	1 m ³
	Wasser, techn.	0,925 m ³		
	Energie, elektrisch	3,0 MJ		
Salze, Spurenelemente und Antibiotika	Kaliumdihydrogenphosphat	300 kg	Salzlösung	1 m ³
	Diammoniumhydrogenphos.	90,2 kg		
	Zitronensäure	38,3 kg		
	Kanamycin	0,789 kg		
	EDTA	189e-6 kg		
	Wasser, techn.	0,793 m ³		
	Energie, elektrisch	3,0 MJ		

Hilfsstoffe Protein-Reinigung				
Lösung I	Natriumchlorid	5,8 kg	Aufschlusspuffer/Lösung I	1 m ³
	Salzsäure konz.	3,3e-6 m ³		
	Tris	6,1 kg		
	Wasser, techn.	0,989 m ³		
	Energie, elektrisch	3,0 MJ		
Lösung II	Harnstoff	480 kg	8 M Harnstoff/Lösung II	1 m ³
	Wasser, techn.	0,637 m ³		
	Energie, elektrisch	3,0 MJ		
	Energie, thermisch	124,0 MJ		
Reinigungslösung CIP				
10 M NaOH	Natriumhydroxid	400 kg	Natronlauge 10 M	1 m ³
	Wasser techn.	0,812 m ³		
Reinigungslösung (NaOH)	Natronlauge 10 M	0,01 m ³	Reinigungslösung (NaOH)	1 m ³
	Wasser techn.	0,99 m ³		
	Energie elektrisch	1000 kJ		
Natronlauge	Natronlauge 10 M	1 m ³	Natronlauge 10 M	1 m ³
Filtration				
Neutr.-lösung	Salzsäure konz.	1 m ³	Neutralisationslösung	1 m ³
Abwasserbehandlung				
Abwasser	Abwasser Prozess neutral.	1 m ³		
SIP/CIP Keramik	Behandlung Abwasser Equipmentreinigung	1 m ³		
Abwasser	Abwasser Ernte/Filtration	1 m ³		
Ernte/Filtration	Behandlung Abwasser Ernte und Filtration	1 m ³		
Abwasser Harnstoffhaltig	Abwasser Filtration Urea	4,152 m ³	8 M Harnstoff	2,004 m ³
	Energie, elektrisch	29,9 MJ	Harnstoff	726.6 kg
	Kühlenergie	23,0 MJ	Wasser techn.	1,5 m ³
Abwasser Sprühtrocknen	Abwasser Sprühtrocknen	1 m ³	Emission Wasser [Luft/allg.]	1.000 kg

6.1.2 Vorketten

In dem Subnetz „Vorketten“ wurden alle relevanten Materialien, Energien und Prozessmedien sowie die Abwassermodule integriert (Anhang U). Soweit vorhanden wurden Datensätze der ecoInvent-Datenbank verwendet. Es wurden generell Datensätze ohne Berücksichtigung der Infrastruktur verwendet, da nur bei wenigen Materialien die Berücksichtigung der Infrastruktur enthalten ist und somit kein Ungleichgewicht der verwendeten Datensätze entstehen sollte. Die einzige Ausnahme stellte die Abwasserbehandlung dar, bei der nur Datensätze mit Berücksichtigung der Infrastruktur verwendet werden können (Erläuterung siehe 6.1.2.3). Die verwendeten Vorketten konnten in Datensätze direkt aus der ecoInvent-Datenbank unterteilt werden und jene, für die über chemische Synthese aus Vorstufen mit Datensätzen aus der ecoInvent-Datenbank ein Modul zur Herstellung der Vorkette simuliert wurde. Bei ecoInvent-Datensätzen wurden die Originaltexte aus der ecoInvent-Beschreibung übernommen (Eng-

lisch). In der Beschreibung der Datensätze waren folgende Angaben zu finden (siehe Anhang V):

- Datenherkunft mit Literaturquellen,
- Bezugsjahr und geographischer Bezug,
- Kurzbeschreibung des jeweiligen Herstellungsprozesses inkl. Annahmen, Vorketten und Transporte (wenn Modul in ecoInvent verfügbar, andernfalls wurde aus Mangel an einem Modul in ecoInvent der Herstellungsprozess aus vorhandenen Modulen in ecoInvent simuliert. Die Erzeugung des Rohstoffs basierend auf der chemischen Reaktionsgleichung ist in diesem Fall hinterlegt),
- Angabe zur Datenqualität (falls vorhanden),
- als Orientierung der Umweltwirkung sind die CO₂-Äquivalente für die Erzeugung von 1 kg Material oder 1 kWh Energie angegeben,
- Angabe, ob für das jeweilige Material ein anderer Datensatz in der ecoInvent-Datenbank zur Verfügung steht.

In den folgenden Unterkapiteln über die verschiedenen Kategorien an Vorketten folgt eine Beschreibung mit generellen Angaben zu der jeweiligen Kategorie. Es wurden hauptsächlich Datensätze mit geographischem Bezug Europa (RER), sowie der Schweiz (CH) verwendet. Ausschließlich für Zucker aus Zuckerrohr wurde ein Datensatz mit geographischem Bezug Brasilien (BR) verwendet (Bezeichnungen wie RER, CH und BR sind die aus ecoInvent stammenden Abkürzungen und wurden zur Nachvollziehbarkeit in dieser Arbeit unverändert übernommen).

6.1.2.1 Materialien

Die Materialien, die direkt aus der ecoInvent-Datenbank entnommen werden konnten, sind in Tabelle 32 aufgelistet. Sind für ein Material mehrere Herstellungsverfahren üblich und die Datensätze für die einzelnen Herstellungsverfahren und ein gemittelter Datensatz vorhanden, der dem Marktanteil der Herstellungsverfahren entspricht, so wurde generell der gemittelte Datensatz verwendet. Wenn nur ein Datensatz vorhanden war, wurde dieser herangezogen.

Tabelle 32: Vorhandene Materialien in der ecoInvent-Datenbank

Material	Name in ecoInvent Datenbank
Natriumhydroxid	Natriumhydroxid, Produktionsmix, ab Werk [RER]
Magnesiumsulfat	Magnesiumsulfat, ab Werk [RER]
Natriumchlorid	Natriumchlorid, Pulver, ab Werk [RER]
Harnstoff	Harnstoff, als N, ab Regionallager [RER]
Salzsäure	Chlorwasserstoff, 30% in H ₂ O, ab Werk [RER]

Diammoniumhydrogenphosphat	0,4 kg Diammoniumhydrogenphosphat, als N, ab Werk [RER] 0,6 kg Diammoniumhydrogenphosphat, als P2O5, ab Werk [RER]
EDTA	EDTA, ab Werk [RER]

Die Materialien in Tabelle 33 mussten, bis auf Glucose, mittels der chemischen Synthese über Vorstufen mit vorhandenen Datensätzen der ecoInvent-Datenbank abgebildet werden. Die entsprechenden Stoffstromnetze inkl. der Berechnung der Massenströme sind in Anhang V enthalten. Die für die Synthese notwendige Energie, sowie entstehende Nebenprodukte und Abtrennungsschritte wurden bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Für den Rohstoff Glucose stand in der ecoInvent-Datenbank nur der Datensatz für die Herstellung von „Zucker“ zur Verfügung. Eine rechnerische Umwandlung von Zucker in Glucose über einen weiteren Verfahrensschritt wäre mit einer zu großen Unsicherheit behaftet gewesen und wurde nicht vorgenommen. Für die Herstellung des Antibiotikums und der Zitronensäure wurden, aufgrund der geringen notwendigen Mengen, mit Literaturangaben der jeweiligen biotechnologischen Herstellung, nur die Mengen der Kohlenstoffquelle grob abgeschätzt und diese, sowie die notwendige elektrische Energie für die Fermentationen berücksichtigt.

Tabelle 33: Materialien über chemische Synthese aus Materialien in der ecoInvent-Datenbank

Material	Name in ecoInvent Datenbank
Kaliumdihydrogenphosphat	0,488 kg Kaliumhydroxid, ab Werk [RER] 0,852 kg Phosphorsäure, Industriequalität, 85% in H2O, ab Werk [RER]
25% Ammoniak	0,228 kg Ammoniak, flüssig, ab Regionallager [RER] 0,685 kg Wasser, vollentsalzt, ab Werk [RER]
Tris(hydroxymethyl)amino-methan	Angenähert über die Herstellung aus Tris(hydroxymethyl)-nitromethan und dessen Herstellung aus Formaldehyd, ab Werk [RER] + Nitromethan (Salpetersäure, 50% in H2O, ab Werk [RER] + Propan/Butan, ab Raffinerie [RER]) + Chlorwasserstoff, 36% in H2O, aus der Reaktion von Propylen mit Chlor, ab Werk [RER]
IPTG	Angenähert über die Synthese der Vorstufen Propanthiol (Schwefel, sekundär, ab Raffinerie, [RER] + Propan/Butan, ab Raffinerie [RER]), Penta-O-Acetyl-D-Galactopyranose (Essigsäureanhydrid, ab Werk, [RER] + Natriumacetat (Essigsäure, 98% in H2O, ab Werk [RER]) + Galactose (Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]) und Natriummethanolat (Natrium (RiL) + Methanol, ab Werk [RER] + Natriumcarbonat, Pulver, ab Werk [RER])
Glucose	Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]
Antibiotika (Kanamycin)	für 0,05 kg Kanamycin 6 kg Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [RER] 0,08 kg Sojaöl, ab Werk [RER] 2,32 kWh Strommix, Produktion RER [RER]
Zitronensäure	für 0,8 kg Zitronensäure 1 kg Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [RER] 2,32 kWh Strommix, Produktion RER [RER]

Für Materialien, wie Harnstoff und Ammoniak, mit dem geographischen Bezug „[RER] – aus einem Regionallager“, wurden als Durchschnittswert Transportaufwendungen mit dem Lkw über 100 km pro t Produkt (entspricht 100 tkm) und „ab Werk“ zusätzlich 500 tkm Schienen-Transport, berücksichtigt. Bei Materialien, deren Verwendung für die Simulation über chemische Synthese angenommen wurden, wurden nur Transportaufwendungen für das finale Material mittels Transport mit Lkw und Schiene berücksichtigt, auch wenn die Ursprungsdatensätze des Materials für die chemische Synthese den geographischen Bezug „[RER] – aus einem Regionallager“ aufwiesen. Bei Glucose wurden als Transportaufwendung zusätzlich 10.000 tkm für „Transport, Frachter Übersee“ berücksichtigt, da bei diesem Material der Transport von Brasilien [BR] mitberücksichtigt werden musste.

6.1.2.2 Energien, Prozessmedien und Transport

Für Kühlenergie, techn. Wasser (vollentsalzt) und Transport mit dem Frachter (Übersee, OCE = oceanic) war in der ecoInvent-Datenbank jeweils nur ein Datensatz vorhanden und somit konnte nur dieser zur Berechnung ausgewählt werden (Tabelle 34).

Tabelle 34: Energien, Prozessmedien und Transport ohne Auswahl in der ecoInvent-Datenbank

Material	Name in ecoInvent Datenbank
Kühlenergie [MJ]	Kälte, Erdgas, ab BHKW mit Absorptionskältemaschine 100 kW [CH]
Wasser, techn.	Wasser, vollentsalzt, ab Werk [RER]
Transport Frachter	Transport, Frachter Übersee [OCE]
Transport Schiene	Transport, Fracht, Schiene [RER]

Für elektrische und thermische Energie, sowie den Transport mit dem Lkw, Druckluft und Dampf waren jeweils mehrere Datensätze in der ecoInvent-Datenbank vorhanden (Tabelle 35). Die Modellierung wurde zunächst mit dem jeweils erstgenannten Datensatz gerechnet. Für die Sensitivitätsanalyse wurde der Einfluss der gewählten Datensätze untersucht, indem die Wirkungsabschätzung der gewählten Module mit anderen zur Verfügung stehenden Datensätzen verglichen wurde. Für die aufgeführten Datensätze wurden als Orientierungsgröße der Umweltwirkung der jeweiligen Datensätze die CO₂-100a-Equivalente angegeben.

Für elektrische und thermische Energie wurden die Datensätze verwendet, die auch für die Datensätze der ecoInvent-Module verwendet wurden (ersichtlich in den Unitprozessen). Für elektrische Energie war das der Datensatz „Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE, ab Netz [UCTE]“ und für thermische Energie der Datensatz „Nutzwärme, Heizöl EL, ab Industriefeuerung 1 MW [RER]“ (UCTE = Union for the Coordination of the Transmission of Electricity). Auch für den Transport mit dem Lkw wurde der üblicherweise bei anderen Roh-

stoffen eingesetzte Datensatz verwendet. Für Druckluft wurde ein Druckluft-Generator auf dem Werksgelände vorausgesetzt und der Datensatz für die durchschnittliche Erzeugung gewählt. Für Dampf wurde eine gesonderte Bereitstellung für den Produktionsprozess des Spinnenseidenproteins angenommen. Die Nutzung eines Dampf-Nebenstroms anderer Herstellungsprozesse, für die ebenfalls Datensätze vorhanden wären (Tabelle 35), kann nicht angenommen werden, da bei der momentanen Ausgangslage nicht davon ausgegangen werden konnte, dass der Spinnenseidenprotein-Herstellungsprozess in räumlicher Nähe zu diesen Prozessen lokalisiert sein würde.

Tabelle 35: Energien, Prozessmedien und Transport mit Auswahl in der ecoInvent-Datenbank
(unterstrichener Datensatz wurde für weitere Modellierung verwendet)

Benötigter Datensatz	kg CO₂ 100a
Energie elektrisch, in kWh	
<u>Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE, ab Netz [UCTE]</u>	0,52945
Strom, ab Mini-BHKW, Allokation Energie	0,29575
Strom, ab BHKW mit Gasmotor, Biogas Landw. abgedeckt, Allokation Exergie	0,15481
Strom, ab BHKW 160kWel Jakobsberg, Allokation Energie	0,34891
Strom, Mittelspannung, Produktion RER, ab Netz [RER]	0,50252
Energie thermisch, in MJ	
<u>Nutzwärme, Heizöl EL, ab Industriefeuerung 1 MW [RER]</u>	0,090918
Nutzwärme, ab Mini-BHKW, Allokation Energie [RER]	0,082095
Nutzwärme, ab BHKW, mit Gasmotor, Biogas Landw. abg., Allokation Exergie	0,004158
Nutzwärme, ab BHKW 160kWel Jakobsberg, Allokation Energie	0,094892
Transport, in tkm	
<u>Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt [RER]</u>	0,12534
Transport, LKW, 16-32t, EURO 4 [RER]	0,15236
Transport, LKW, 16-32t, EURO 3 [RER]	0,16796
Transport, LKW, 16-32t, EURO 5 [RER]	0,15429
Transport, Lkw 3.5-16t, Flottendurchschnitt [RER]	0,33165
Druckluft, 6 bar, in m³	
<u>Druckluft, durchschnittliche Erzeugung, >30 kW, 6 bar, ab Kompressor [RER]</u>	0,083377
Druckluft, beste Erzeugung, >30 kW, 6 bar, ab Kompressor [RER]	0,055044
Druckluft, optimierte Erzeugung, >30kW, 6 bar, ab Kompressor [RER]	0,071453
Dampf, in kg	
<u>Dampf, für chemische Prozesse, ab Werk [RER]</u>	0,23364
Dampf, aus der Formaldehyd-Produktion, ab Werk [RER]	0,031041
Dampf aus direkter Oxidation von n-Butan, ab Werk [RER]	0,081561
Dampf aus der partiellen Oxidation von Benzol, ab Werk [RER]	0,068212

6.1.2.3 Abwasserbehandlung

Die Datensätze zur Abbildung der Behandlung des Abwassers wurden mit dem in ecoInvent zur Verfügung gestellten Excel-Berechnungsprogramm „13_WWTv2“ erstellt. Dieses Berechnungsprogramm erstellt auf Basis der genauen Zusammensetzung des zu entsorgenden

Abwassers die notwendigen Vorprozesse und resultierenden Emissionen eines durchschnittlichen Schweizer Klärwerks (geographischer Bezug CH). In der Berechnung können 39 chemische Elemente in Zusammensetzung oder als Summenparameter angegeben werden. Alle chemischen Elemente des hier betrachteten Abwassers wurden berücksichtigt. In Tabelle 36 bis Tabelle 38 sind die jeweiligen Konzentrationen aufgeführt, mit denen die Abwasserbehandlungs-Module „Behandlung Abwasser Ernte und Filtration“, „Behandlung Abwasser Equipment-Reinigung“ und „Behandlung Abwasser Harnstoff“ mit dem ecoInvent-Berechnungsprogramm erstellt wurden.

Tabelle 36: Konzentration des Abwassers der Ernte und Filtration

Chemisches Element	Symbol	Konzentration [kg/m ³]
Kohlenstoff	C	4,22E+00
Schwefel	S	5,99E-01
Stickstoff	N	1,29E+00
Phosphor	P	6,29E-01
Bor	B	1,95E-04
Chlor	Cl	2,31E-01
Cobalt	Co	2,54E-04
Kupfer	Cu	2,08E-04
Mangan	Mn	1,42E-03
Molybdän	Mo	4,16E-04
Zink	Zn	1,77E-03
Eisen	Fe	1,06E-03
Kalium	K	6,27E-01
Magnesium	Mg	4,57E-01
Natrium	Na	1,45E-01

Tabelle 37: Konzentration des Abwassers der Equipment-Reinigung

Chemisches Element	Symbol	Konzentration [kg/m ³]
Chlor	Cl	2,45
Natrium	Na	2,45

Tabelle 38: Konzentration des harnstoffhaltigen Abwassers

Chemisches Element	Symbol	Konzentration [kg/m ³]
Stickstoff	N	376,6

Da die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung von Kläranlagen gezeigt haben, dass aufgrund der Behandlung und Verarbeitung der hochverdünnten Lösungen die Berücksichtigung der Infrastruktur einen großen Einfluss hat, wurde beim ecoInvent-Berechnungsprogramm die Infrastruktur berücksichtigt (Modul „ecoInvent 13-IV_Wastewater_treatment_v2.1“). Es konnte zwischen fünf verschiedene Größenordnungen an Kläranlagen gewählt werden. Es

wurde für die Behandlung des hier betrachteten Abwassers die mittlere Größe (Klasse 3) ausgewählt. Die Entsorgung des Klärschlammes konnte zwischen einer Verbrennung und einer Ausbringung auf dem Feld verteilt werden. Es wurde mit den voreingestellten Werten gerechnet, die der durchschnittlichen Verwendung des Klärschlammes einer Kläranlage dieser Größenordnung entsprechen. Die Klärleistung der Kläranlagen, die Basis des Berechnungsprogramms waren, wies nicht für alle Abwasserbelastungen eine vergleichbare Klärleistung auf. So konnte die Stickstoff-Fraktion nur um 7 bis 28% abgereichert werden, jedoch die Kohlenstoff-Fraktion um 80 bis 90%. Dies zeigt, dass die Art der Abwasserzusammensetzung einen großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse der Wirkungsabschätzung haben kann.

6.1.3 Betrachtete Gutschriften

Allokationen werden notwendig, wenn bei einem Produktionsprozess Koppelprodukte entstehen, sowie Aufwendungen für Recycling und die Abfallverwertung in einem gerechten Maß einbezogen werden sollen. Es besteht das Problem, Allokationen im Prozess gerecht vorzunehmen. Eine Möglichkeit dieses Problem zu lösen ist, durch Systemerweiterungen den Betrachtungsrahmen zu erweitern und alle anfallenden Aufwendungen, Umweltentlastungen und -belastungen im weiteren Lebensweg zu berücksichtigen. Systemerweiterungen können jedoch schnell zu sehr großen und unübersichtlichen Systemen führen. Eine andere Lösungsmöglichkeit besteht in dem Einsatz von Gutschriften. Dazu müssen die mit der Produktion des Koppelprodukts verbundenen Umweltlasten vom eigentlich betrachteten System abgezogen werden⁵⁰.

Im Produktionsprozess des Spinnenseidenproteins wurden verschiedene Allokation über Gutschriften vorgenommen.

- In einem Closed-Loop Recycling wurde die Aufbereitung der Harnstoff-Lösung durch Filtration und dessen Wiederverwendung als Sekundärrohstoff angenommen und im betrachteten System wieder eingeschleust. Der Energiebedarf für die Aufbereitung durch Filtration wird berücksichtigt. Die Aufbereitung des Harnstoffs für einen Prozess im Produktionsmaßstab wurde vorausgesetzt und deswegen bei der normalen Prozessberechnung integriert. Für die Bewertung des Einflusses der Aufbereitung des Harnstoffs wurde die Aufbereitung ausgesetzt und das anfallende Abwasser mit dem erstellten Modul „Behandlung Abwasser Harnstoff“ vorgenommen. Die Gutschrift des Harnstoffrecyclings erfolgte unter der Prämisse, dass der aufbereitete Harnstoff als Sekundärrohstoff geeignet und dem Primärrohstoff funktionell äquivalent war, sowie die Aufwendungen für das Harnstoff Recycling dem Herstellungsprozess der Spinnenseide zugeschrieben werden kann.

- In einem Closed-Loop Recycling wurde die Aufbereitung von Abwasser zu technischem Wasser und dessen Verwendung als Sekundärrohstoff angenommen und im betrachteten System wieder eingeschleust. Der Energiebedarf für die Aufbereitung des Abwassers durch Filtration wurde dem Herstellungsprozess der Spinnenseide zugeschrieben.
- In einem Open-Loop Recycling wurde die bei der Aufbereitung des Abwassers entstehende nährstoffreiche Fraktion zur Verwendung als Sekundärrohstoff „Düngemittel“ für die Landwirtschaft angenommen. Die für eine vergleichbare Menge an Düngemittel notwendigen Aufwendungen wurden dem Herstellungsprozess der Spinnenseide zu 50% gutgeschrieben, ebenso wie die entstehenden Emissionen aus der Ausbringung des Düngemittels auf dem Feld. Bei der Fermentation wurden verschiedene Salze verwendet, die anschließend bei den Prozessschritten Ernte und Filtration mit dem Abwasser abgeführt wurden. Nach einer Inaktivierung in einem Durchflussautoklav konnte eine Verwendung des Abwassers als Düngemittel angenommen werden. Dazu wurde zunächst das Abwasser konzentriert, eine Fraktion techn. Wasser abgeführt und die verbleibende Menge Abwasser autoklaviert. Zum Autoklavieren von 1 m³ Abwassers wurde bei einem Durchfluss von 2 m³/h 80 kg Dampf und 4,2 kWh elektrische Energie benötigt¹³⁴.
- In einem Open-Loop Recycling wurde das bei der Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung entstehende Natriumchlorid als „Natriumchlorid in Lösung“ dem Prozess zu 100% gutgeschrieben. Die Aufwendungen zur Aufbereitung des Abwassers wurden dem Herstellungsprozess der Spinnenseide zu Lasten gestellt.

Die Gutschrift „Düngemittel“ wurde durch eine anteilige Verringerung der Aufwendungen für die Herstellung der Materialien vorgenommen, die für die Düngung einen Zusatznutzen bringen. Die dafür berücksichtigten Materialien sind in Tabelle 39 aufgeführt. Bei der Gutschrift wurde der Transport der Materialien dem Herstellungsprozess der Spinnenseide zugeschrieben. Die Allokation wurde im Verhältnis 50% durchgeführt, somit teilten sich der Herstellungsprozess der Spinnenseide und der folgende landwirtschaftliche Prozess die aus der Herstellung und Ausbringung auf dem Feld entstehenden Emissionen.

Tabelle 39: Materialien der Gutschrift „Düngemittel“ & „Natriumchlorid in Lösung“, Allokation jeweils zu 50%

Gutschrift „Düngemittel“	
Ammoniaklösung 25%	
Diammoniumhydrogenphosphat	
Kaliumdihydrogenphosphat	
Magnesiumsulfat	
Zitronensäure	
Harnstoff	
Natriumchlorid	
Gutschrift „Natriumchlorid in Lösung“	
Natriumchlorid	

In Tabelle 40 sind die Bilanzparameter der einzelnen Gutschriften aufgeführt. Die Gutschrift des Harnstoffs wurde mit den Werten aus 6.1.1, Tabelle 31 vorgenommen, die ausbleibende Aufbereitung des harnstoffhaltigen Abwassers und Entsorgung über die Kläranlage ist in Tabelle 22 aufgeführt.

Tabelle 40: Bilanzparameter zur Durchführung der Gutschriften

Prozessschritt	Input	Output
Abwasser Harnstoffhaltig	Abwasser Filtration Urea Behandlung Abwasser Harnstoff	1 m ³ 1 m ³
Abwasser SIP/CIP Keramik	Abwasser Prozess neutr. Energie, elektrisch Kühlenergie	1 m ³ 7,2 MJ 5,5 MJ
Abwasser Ernte/ Filtration	Abwasser Ernte/Filtration Energie, elektrisch Kühlenergie	1 m ³ 7,2 MJ 5,5 MJ
Autoklavierung	Abwasser Düngemittel Dampf Energie, elektrisch	1 m ³ 80 kg 4,2 MJ
		Wasser techn. 0,9 m ³ Natriumchlorid 2,45 kg
		Abwasser Düngemittel 0,4 m ³ Wasser techn. 0,6 m ³
		Kohlenstoff [Boden/Landw.] 1,1E+01 kg Schwefel [Boden/Landw.] 1,5E+00 kg Stickstoff [Boden/Landw.] 3,2E+00 kg Phosphor [Boden/Landw.] 1,6E+00 kg Bor [Boden/Landw.] 4,9E-04 kg Chloride [Boden/Landw.] 5,8E-01 kg Cobalt [Boden/Landw.] 6,4E-04 kg Kupfer [Boden/Landw.] 5,2E-04 kg Mangan [Boden/Landw.] 3,6E-03 kg Molybdän [Boden/Landw.] 1,0E-03 kg Zink [Boden/Landw.] 4,4E-03 kg Eisen [Boden/Landw.] 2,7E-03 kg Kalium [Boden/Landw.] 1,6E+00 kg Magnesium [Boden/Landw.] 1,1E+00 kg Natrium [Boden/Landw.] 3,6E-01 kg

6.1.4 Variation bestimmter Prozessparameter

Um den Einfluss bestimmter Prozessschritte und –parameter genauer untersuchen zu können, wurden bestimmte Variationen betrachtet:

- Ernte mit fünf kleinen Separatoren, anstatt eines großen Separators (Kapitel 6.1.4.1)
- Filtration mit einem Rohr-, anstatt eines Keramikmoduls Kapitel 6.1.4.2)
- Clean-in-Place ohne Wärmerückgewinnung beim Steam-in-Place (Kapitel 6.1.4.3)
- Einfluss der Ausbeute bei der Fermentation (10 g/l anstatt 5 g/l) und Einfluss von Ausbeuteverlusten bei der Proteinreinigung (Kapitel 6.1.4.4)

Es werden im Weiteren stets die vollständigen Prozessmodule, wie sie in Umberto verwendet wurden, dargestellt. Die Abweichungen zu den Modulen, die in 6.1.1 beschrieben sind, sind durch Unterstreichung kenntlich gemacht.

6.1.4.1 Zellernte mit kleinen Separatoren

Für die Zellernte kann statt des großen Separators CSE 170 auch der Separator des Typs BTPX 205 von Alfa Laval, ein Gerät für Pilotanlagen, verwendet werden. Die Flussrate dieses Gerätetyps liegt für die Zellabtrennung bei *E. coli* zwischen 150 bis 170 l/h bei 20 bis 22 g/l BTM mit einer Ausbeute von mehr als 98%^{86,87}. Es ist dabei eine Konzentrierung auf 110 bis 130 g/l der Biotrockenmasse möglich. Dieser Separator hat eine Anschlussleistung von 6,5 kW. Bei 8.500 l abzutrennendem Volumen empfiehlt es sich fünf parallellaufende Separatoren zu verwenden. Dies führte mit 70% der maximalen Anschlussleistung zu einem Energieverbrauch von:

$$E_{5 \text{ Separatoren BTPX 205}} = 5 \cdot 6,5 \text{ kW} \cdot 0,7 \cdot \frac{8.500 \text{ l}}{5 \cdot 170 \frac{\text{l}}{\text{h}}} = 227,5 \text{ kWh} = 769,9 \text{ MJ} \quad \text{Formel 32}$$

Tabelle 41: Stromaufnahme der Separatoren (5 m³ Batch)

Beschreibung	Anzahl	Anschlussleistung [kW]	Laufzeit [h]	Verbrauch pro Batch [MJ]	Wärmemenge pro Batch [MJ]
Separator klein	5	6,5	9,4	769,9	592,2
Separator groß	1	45,0	2,8	320,9	246,9

Zusammen mit der Wärme, die in diesem Prozessschritt abgeführt werden musste, addierte sich die benötigte Kühlenergie auf 1.052 MJ. Für die Betrachtung der kleinen Separatoren wurden die in Tabelle 42 aufgeführten Parameter verwendet.

Tabelle 42: Bilanzparameter für die Ernte mit fünf kleinen Separatoren

Prozessschritt	Input		Output	
Ernte Separator klein	Zellmasse vor Ernte	5 m ³	Zellmasse vor Aufschluss	3,5 m ³
	<u>Energie, elektrisch</u>	<u>786,3 MJ</u>	Abwasser Ernte	8,5 m ³
	<u>Kühlenergie</u>	<u>1.052,9 MJ</u>		

6.1.4.2 Filtrationsschritt mit Rohrmodul

Für die Reinigung der Spinnenseide mit Filtration eigneten sich wegen des hohen Feststoffanteils Keramik- und Hohlmodule. Spiralwickel- oder Hohlfasermodule sind für die Klärung nach Zellaufschluss und nach der NaOH-Behandlung ungeeignet, da der hohe Feststoffanteil zu einer Verstopfung der engen Zwischenräume und Fasern führt^{90S 549}.

Bei Bailey und Meagher 1997¹¹⁶ und 2000¹¹⁷ wurden verschiedene Rohrmodule untersucht, die auch für die Reinigung der Spinnenseide geeignet wären. Mit den Ergebnissen der Untersuchung der Abtrennung verschiedener Rohrmodule, u.a. Celluloseacetat, Polyethersulfon, Polyvinylidenfluorid, zeigte Celluloseacetat die besten Filtrationsergebnisse bezüglich Flux und der Abtrennung von Verunreinigungen. Mit den Ergebnissen für Celluloseacetat, einem Rückhalt der Verunreinigungen von 0,35 und einem Flux durch die Membran von 55 bis $65 \frac{l}{m^2 \cdot h}$, wurde die Berechnung der Filtration angepasst. Die zugehörigen Werte analog der Berechnung des Keramik-Moduls befinden sich in Anhang M. Die veränderten Parameter im Vergleich zum Keramikmodul, mit einem Rückhalt der Verunreinigungen von 0,2 und einem Flux durch die Membran von 120 bis 200 l/(m²·h), resultierte beim Rohrmodul in geringeren Diafiltrationsvolumina und höheren Filterflächen. Die geringeren Diafiltrationsvolumina führten einerseits bei der Filtration zu einem geringeren Verbrauch an Lösungen und techn. Wasser, und dadurch zu kleineren Behältern für die Lösungsbereitstellung, die dadurch weniger der Reinigungsmedien beim CIP verbrauchten. Andererseits führt der geringere Verbrauch an 8M Harnstoff zu geringeren Abwassermengen und so zu einem geringeren Verbrauch an elektrischer Energie sowie Kühlenergie bei der Aufbereitung des Harnstoffs. Die Werte für eine Filtration mit einem Rohrmodul aus Celluloseacetat sind in Tabelle 43 aufgeführt.

Tabelle 43: Bilanzparameter für die Filtration mit Rohrmodul

Prozessschritt	Input		Output	
Filtration Rohrmodul	Zellmasse vor Aufschluss	3,5 m ³	Retentat nach Filtration3	0,25 m ³
	Wasser techn.	6,344 m ³	Abwasser Filtration	9,676 m ³
	Lösung I	1,658 m ³	Abwasser Harnstoff	3,252 m ³
	Harnstoff	755,5 kg		
	Lösung II	1,105 m ³		
	Natronlauge 10M	12,5e-3 m ³		
	Neutralisationslösung	12,5e-3 m ³		
	Energie, elektrisch	46,2 MJ		
	Energie, thermisch	462,5 MJ		
	Kühlenergie	346,1 MJ		
SIP/CIP- Reinigung Rohrmodul	Reinigungslösung 1 (NaOH)	4,78 m ³	Reinigung Equipment	1 unit
	Neutralisationslösung	0,0478 m ³	Abwasser Prozess neutral.	11,97 m ³
	Wasser techn.	7,19 m ³		
	Dampf (kg)	37,98 kg		
	Energie, elektrisch	4,9 MJ		
	Energie, thermisch	234,7 MJ		
Abwasser Harnstoff- haltig	Kühlenergie	24,3 MJ		
	Abwasser Filtration Urea	3,252 m ³	8 M Harnstoff	1,105 m ³
	Energie, elektrisch	23,4 MJ	Harnstoff	726,6 kg
	Kühlenergie	18,0 MJ	Wasser techn.	1,0 m ³

Für die Betrachtung des Einflusses des Verbrauchs an Filtermaterial wurde das Modul der Filtration um die Menge an Zirkonoxid erweitert, die pro 5 m³ Reinigung verbraucht wurde (Tabelle 44). Die Aufwendungen für die Herstellung des Filters aus Zirkonoxid wurden vernachlässigt und nur der reine Materialverbrauch berücksichtigt.

Tabelle 44: Bilanzparameter für die Filtration mit Keramikmodul

Prozessschritt	Input		Output	
Filtration Keramik- modul	Zellmasse nach Aufschluss	3,5 m ³	Retentat nach Filtration3	0,25 m ³
	Wasser techn.	9,491 m ³	Abwasser Filtration	14,172 m ³
	Lösung I	3,006 m ³	Abwasser Harnstoff	4,152 m ³
	Harnstoff	755,5 kg		
	Lösung II	2,004 m ³		
	Natronlauge 10M	12,5e-3 m ³		
	Neutralisationslösung	12,5e-3 m ³		
	Energie, elektrisch	57,0 MJ		
	Energie, thermisch	462,5 MJ		
	Kühlenergie	555,8 MJ		
	Zirkonoxid	0,0033 kg		

Dem Verbrauch von Zirkonoxid sollte der Verbrauch von Filtermaterial beim Rohrmodul gegenübergestellt werden. Jedoch war vom betrachteten Filtermaterial Celluloseacetat kein Datensatz in der ecoInvent-Datenbank vorhanden.

Typische Filtermaterialien sind in Tabelle 45 aufgeführt. Für den Vergleich der Filtermaterialien wurde bei der Modellierung anstatt mit Celluloseacetat (CA), mit Polyvinylidenfluorid (PVDF) gerechnet. Die Menge an Filtermaterial berechnete sich zu $4,1 \cdot 10^{-3}$ kg pro 5 m³ Batch

(Anhang M). Die für die Betrachtung verwendeten Parameter befinden sich in Tabelle 46. Für PVDF wurde eine Entsorgung in der Müllverbrennung angenommen, für Zirkonoxid die Wiederverwendung als Sekundärrohstoff. Es wurden für die Wiederverwendung keine Aufwendungen oder Gutschriften betrachtet, sondern nur der reine Materialverbrauch betrachtet.

Tabelle 45: Verschiedene Filtermaterialien, deren Porengröße und Verfügbarkeit des Datensatzes bei ecoInvent

CA Celluloseacetat, PES Polyethersulfon, PVDF Polyvinylidenfluorid, PTFE Polytetrafluorethylen, PC Polycarbonat

Material	Keramik	CA	PES	PVDF	PTFE	PC
Porengröße [µm]	0,14	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1
EcoInvent Datensatz	ja	nein	nein	ja	ja	ja

Tabelle 46: Bilanzparameter für die Filtration mit Rohrmodul

Prozessschritt	Input	Output
Filtration	Zellmasse vor Aufschluss	3,5 m ³ Retentat nach Filtration3
Rohrmodul	Wasser techn.	6.344 l Abwasser Filtration
	Lösung I	1.658 l Abwasser Harnstoff
	Harnstoff	755,5 kg
	Lösung II	1.105 l
	Natronlauge 10M	12,5e-3 m ³
	Neutralisationslösung	12,5e-3 m ³
	Energie, elektrisch	46,2 MJ
	Energie, thermisch	462,5 MJ
	Kühlenergie	346,1 MJ
	<u>PVDF</u>	<u>4,13e-3 kg</u>

6.1.4.3 Clean-in-Place ohne Wärmerückgewinnung beim Steam-in-Place

In der Prozessbetrachtung in Kapitel 5.1.2.3 wurde von einer 80%igen Wärmerückgewinnung der notwendigen thermischen Energie beim Clean-in-Place (CIP) ausgegangen. Diese Annahme sollte hinsichtlich ihrer Auswirkung überprüft werden, indem die Modellierung ohne die Wärmerückgewinnung gerechnet wurde. Die thermische Energie wurde mit 1.306,1 MJ gerechnet. Es musste auch die notwendige Kühlenergie angepasst werden. Wird die thermische Energie nach SIP/CIP nicht zum Aufwärmen der Lösungen genutzt, muss mit einem Betrag von 128,5 MJ für die Kühlenergie gerechnet werden. Um zusätzlich die Wärme der CIP-Lösungen nach dem Einsatz vollständig abzuführen, wurden 80% der zugeführten thermischen Energie als notwendige Kühlenergie angesetzt, d.h. 1.044,8 MJ, in Summe ergeben sich 1.173,3 MJ an notwendiger Kühlenergie (Tabelle 47).

Tabelle 47: Bilanzparameter für CIP ohne Wärmerückgewinnung

Prozessschritt	Input	Output
SIP/CIP-Reinigung Keramik-modul	Reinigungslösung 1 (NaOH)	5,32 m ³
	Neutralisationslösung	0,0532 m ³
	Wasser techn.	7,36 m ³
	Dampf (kg)	37,98 kg
	Energie, elektrisch	4,9 MJ
	<u>Energie, thermisch</u>	<u>1.306,1 MJ</u>
	<u>Kühlenergie</u>	<u>1.173,3 MJ</u>

6.1.4.4 Einfluss der Ausbeute auf die Gesamtbilanz

Zur Untersuchung des Einflusses der Ausbeute auf die Wirkungsabschätzung wurde die Modellierung der Herstellung der Spinnenseide mit unterschiedlichen Ausbeuten gerechnet (siehe Tabelle 29, Kapitel 5.1.4). Dazu musste nur beim Prozessschritt der Sprühtrocknung die resultierende Menge Spinnenseidenprotein angepasst werden (Tabelle 48).

Tabelle 48: Bilanzparameter für verschiedene Ausbeuten

xx = Menge getrocknetes Protein, dass aufgrund der Ausbeuteberechnung abgeschätzt wird

Prozessschritt	Input	Output
Sprühtrocknen	Retentat nach Filtration ³	0,25 m ³
	Energie, elektrisch	50,4 MJ
	Kühlenergie	38,8 MJ
		<u>Getrocknetes Protein</u> xx kg
		Abwasser Sprühtrocknen 0,25 m ³

6.2 Modellierung der Herstellung eines bio-inspirierten Seidenfilters

6.2.1 Modellierung des Spinnenseiden-Submikrogewebes

In Abbildung 42 ist die Modellierung der Herstellung des Seidengewebes in Umberto abgebildet.

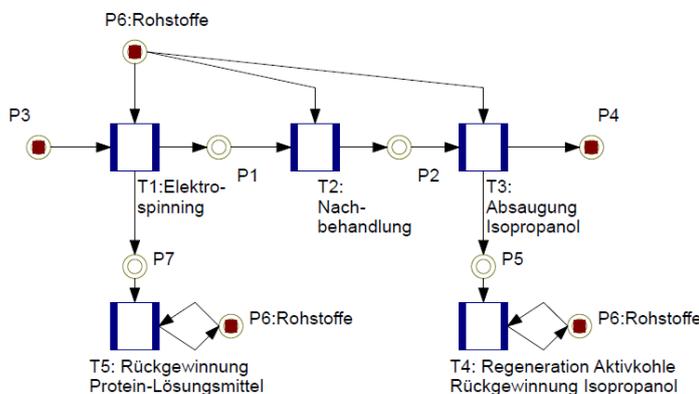


Abbildung 42: Subnetz der Herstellung des Spinnenseiden-Seidengewebes

Tabelle 49: Bilanzparameter der Herstellung des Spinnenseiden-Gewebes

Prozessschritt	Input		Output	
Elektrospinning	Protein getrocknet	0,115 g	Seidenfilter	1 unit
	Lösungsmittel	1,75 g	Lösungsmittel	1,75 g
	Energie, elektrisch	5,4 kJ		
Rückgewinnung Lösungsmittel	Lösungsmittel	1 kg	Lösungsmittel	1 kg
	Energie, elektrisch	10 kJ		
	Kühlenergie*	296 kJ		
Nachbehandlung	Seidenfilter	1 unit	Seidenfilter	1 unit
	Isopropanol	16,7 g	Isopropanol (L)	16,7 g
	Energie, elektrisch	2,5 kJ		
Absaugung Isopropanol	Seidenfilter	1 unit	Seidenfilter	1 unit
	Isopropanol (L)	16,7 g	Isopropanol (L)	16,7 g
	Aktivkohle	72,6 g	Aktivkohle beladen	72,6 g
	Energie, elektrisch	2,5 kJ		
Regeneration Aktivkohle/Rückgewinnung Isopropanol	Isopropanol (L)	0,23 kg	Isopropanol	0,23 kg
	Aktivkohle beladen	1,0 kg	Aktivkohle	1 kg
	Energie, elektrisch	10 kJ		
	Energie, thermisch	347,1 kJ		
	Kühlenergie	347,1 MJ		

*Bei der Kühlenergie, die zum Rückgewinnen des Lösungsmittels HFIP beim Elektrospinning notwendig ist, musste vernachlässigt werden, dass das verwendete ecoInvent-Modul nur bis 6°C kühlt, da kein anderes Modul zur Verfügung stand.

In Abbildung 43 ist das in Umberto modellierte Stoffstromnetz des Lebenswegs des bio-inspirierten Spinnenseiden-Submikrogewebes abgebildet. Die für die Modellierung verwendeten Daten sind in Tabelle 50 zusammengefasst.

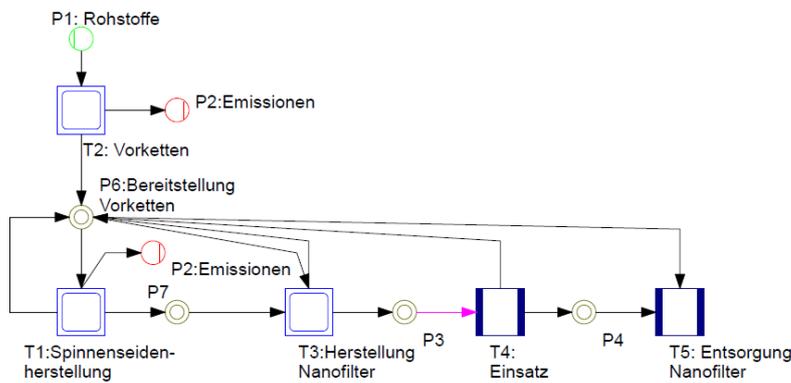


Abbildung 43: Stoffstromnetz der Herstellung eines bio-inspirierten Spinnenseiden-Gewebes

Tabelle 50: Bilanzparameter des Einsatzes des Spinnenseiden-Gewebes

	Spinnenseide- Submikrogewebe Pro Unit	Gutschrift Pro Unit
Filtermaterial	0,115 g Spinnenseide Bilanzparameter siehe Tabelle 31	55 g PP
Herstellung Filtergewebe	-	ecoInvent Modul „Vliesherstellung“ bezogen auf eingesetztes Material
Herstellung Spinnenseide Submikrogewebe	Bilanzparameter siehe Tabelle 49	-
Energieeinsparung während Produkteinsatz	5.760 kJ bei 8 h Filtereinsatz	-
Entsorgung	ecoInvent Module „Entsorgung, Bioabfall, 60% Wasser, in Kehrichtverbren- nung“	ecoInvent Modul „Entsorgung, Polypropylen, 15.9% Wasser, in Kehrichtver- brennung“

6.2.2 Modellierung der Gutschrift wegen Materialeinsparung

Im Vergleich zu einem Serienstaubbeutel ergab sich eine Einsparung von Filtermaterial von 50 bis 60 g pro Filterbeutel, daher wurde mit einer Einsparung von 55 g gerechnet. Für diese Einsparung an Material wurde ein Modul in Umberto modelliert, dass die Erzeugung des Polypropylen, dessen Verarbeitung zu einem Gewebe und die Entsorgung über den Hausmüll berücksichtigt (Abbildung 44). Die verwendeten Datensätze aus ecoInvent waren für Polypropylen „Polypropylen Granulat, ab Werk [RER]“, für die Vliesherstellung „Vliesherstellung Polyethylenterephthalat [RER]“, da die Herstellungsmethode für PET und PP vergleichbar ist, sowie für die Entsorgung des Filtergewebes „Entsorgung Polypropylen, 15,9% H₂O, in Kehrichtverbrennung“.

Wegen Einsparung von üblicherweise für einen Staubbeutel verwendetem Filtermaterial konnten die Aufwendungen der Herstellung und Entsorgung des Polypropylen-Filtergewebes als reine Gutschrift von der Gesamtbilanz des Spinnenseiden-Gewebes abgezogen werden. Die daraus resultierenden Werte der Gesamtbilanz wurden als separater Wert dargestellt.

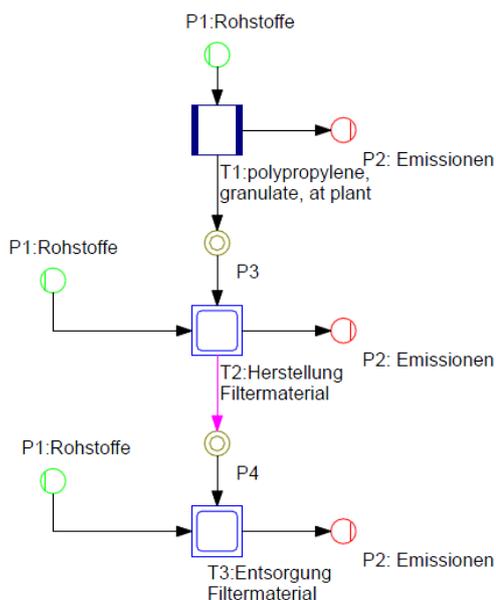


Abbildung 44: In Umberto modelliertes Stoffstromnetz zur Einsparung an Filtermaterial

Tabelle 51: Bilanzparameter für die Einsparung an Polypropylen Gewebe

Prozessschritt	Input	Output
Herstellung Filtermaterial	Polypropylen Granulat	0,055 kg
	Vliesherstellung	0,055 kg
Filtermaterial nach Verwendung	Polypropylenfilter	1 unit
	PP zur Entsorgung	0,055 kg
Entsorgung Filtermaterial	<u>Entsorgung Polypropylen,</u>	<u>1 kg</u>
	<u>15,9% Wasser</u>	
	<u>PP zur Entsorgung</u>	<u>0,841 kg</u>

6.3 Zusammenfassung der Modellierung

Die Daten für den biotechnologischen Herstellungsprozess der rekombinanten Spinnenseide wurden entsprechend des Forschungsstandes von 2013, basierend auf dem Laborprozess, hochskaliert und auf den Produktionsmaßstab übertragen. Es wurden für die notwendigen Daten der Modellierung Annahmen und Festlegungen getroffen. Diese sind entsprechend der Forderung der ISO 14040 klar dokumentiert. Alle relevanten Vorketten wurden in der Modellierung berücksichtigt, hierfür wurden Datensätze der ecoInvent-Datenbank verwendet. Keine Materialflüsse wurden durch ein Abschneidekriterium eingeschränkt. Ausschließlich die Bereitstellung der geringen Mengen an Spurenelementen wurde für die Herstellung der Spinnenseide vernachlässigt, deren Entsorgung im Abwasser jedoch berücksichtigt. Stand für ein verwendetes Material kein Datenmodul zur Verfügung, wurde die Synthese des Materials mittels bestehender Datenmodule aus ecoInvent modelliert. Für alle im Prozess benötigten Rohstoffe wurde der Transport berücksichtigt. Für Datensätze mit geographischem Bezug (RER) wurde ein durchschnittlicher Transportweg von 300 km angenommen.

Verwendete Daten zur Modellierung des Herstellungsprozesses der Spinnenseide:

Direkte Daten wurden verwendet für:

- Fermentationsprozess - hochskaliert vom 10 L Laborprozess
- Proteinreinigung – hochskaliert vom 10 L Laborprozess
- Reinigung des Prozessequipments – berechnet nach DIN 28136¹⁴⁹ und ASME BPE Guide 2007¹⁵⁰

Indirekte Daten wurden verwendet für:

- generische Datensätze aus ecoInvent für Materialien, Energien und Prozessmedien:
 - Natriumhydroxid, Produktionsmix, ab Werk [RER],
 - Magnesiumsulfat, ab Werk [RER],
 - Natriumchlorid, Pulver, ab Werk [RER],
 - Harnstoff, als N, ab Regionallager [RER],
 - Chlorwasserstoff, 30% in H₂O, ab Werk [RER]
 - Diammoniumhydrogenphosphat, 0,4 kg als N und 0,6 kg als P₂O₅, ab Werk [RER]
 - EDTA, ab Werk [RER]
 - Kälte, Erdgas, ab BHKW mit Absorptionskältemaschine 100 kW [CH]
 - Wasser, vollentsalzt, ab Werk [RER]
 - Strom, Mittelspannung, Produktion UTCE, ab Netz [UCTE]
 - Nutzwärme, Heizöl EL, ab Industriefeuerung 1 MW [RER]
 - Druckluft, durchschnittliche Erzeugung, >30 kW, 6 bar, ab Kompressor [RER]
 - Dampf, für chemische Prozesse, ab Werk [RER]
 - Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt [RER]
 - Transport Schiene [RER]
 - Transport, Fracht, Schiene [RER]
 - Transport, Frachter Übersee [OCE]
- generische Datensätze generiert mit ecoInvent-Berechnungsprogramm für die Abwasserbehandlung:
 - Behandlung Abwasser Ernte und Filtration, in Abwasserbehandlung Kl.3 [CH],
 - Behandlung Abwasser Equipment-Reinigung, in Abwasserbehandlung Kl.3 [CH],
 - Behandlung Abwasser Harnstoff, in Abwasserbehandlung Kl.3 [CH],
- generische Datensätze aus ecoInvent für Vorstufen von Materialien:
 - Kaliumdihydrogenphosphat: „Kaliumhydroxid, ab Werk [RER]“ + „Phosphorsäure, Industriequalität, 85% in H₂O, ab Werk [RER]“

- 25% Ammoniak: „Ammoniak, flüssig, ab Regionallager [RER]“ + „Wasser, vollentsalzt, ab Werk [RER]“
- Tris(hydroxymethyl)-aminomethan: „Formaldehyd, ab Werk [RER]“ + Nitromethan („Salpetersäure, 50% in H₂O, ab Werk [RER]“ + „Propan/Butan, ab Raffinerie [RER]“) + „Chlorwasserstoff, 36% in H₂O, aus der Reaktion von Propylen mit Chlor, ab Werk [RER]“
- IPTG: Propanthiol („Schwefel, sekundär, ab Raffinerie [RER]“ + „Propan/Butan, ab Raffinerie [RER]“), Penta-O-Acetylβ-D-Galactopyranose („Essigsäureanhydrid, ab Werk, [RER]“ + Natriumacetat („Essigsäure, 98% in H₂O, ab Werk [RER]“ + Galactose („Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]“) und Natriummethanolat („Natrium (RiL)“ + „Methanol, ab Werk [RER]“ + „Natriumcarbonat, Pulver, ab Werk [RER]“)
- Glucose: „Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]“
- Antibiotika: „Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]“ + „Sojaöl, ab Werk [RER]“ + „Strom, Mittelspannung, Produktion UTCE, ab Netz [UCTE]“
- Zitronensäure: „Zucker, aus Zuckerrohr, ab Zuckerherstellung [BR]“ + „Strom, Mittelspannung, Produktion UTCE, ab Netz [UCTE]“

Verwendete Daten zur Anwendung der Spinnenseide als Submikrogewebe in einem Staubbeutel

Verwendete Daten für die Herstellung des Seidenfiltergewebes:

- Der Materialverbrauch und Energiebedarf für die Herstellung des Submikrogewebes im industriellen Maßstab durch Elektrospinning wurde mit Angaben aus dem UBA-Text 34/2010 berechnet⁴⁵. Diese Daten beziehen sich auf einen Kabinenluftfilter im PKW:
 - 0,5 m² Submikrogewebe mit 0,25 g Materialverbrauch
 - 0,0075 kWh für Elektrospinning
 Die Energie zur Rückgewinnung des Lösungsmittels der Elektrospinn-Lösung wurde ohne Verlust an Lösungsmittel abgeschätzt und berücksichtigt.
- Die Nachbehandlung des Spinnenseiden-Submikrogewebes mit Isopropanol wurde für den industriellen Maßstab abgeschätzt, die anschließende Absaugung des im Gewebe verbleibenden Isopropanols berücksichtigt, die Aufbereitung des Isopropanols und der Aktivkohle wurde abgeschätzt, jedoch kein Verlust berücksichtigt.

Verwendete Daten für den Einsatz als Staubbeutel in einem Staubsauger:

- Labordaten für Energieeinsparung des Staubbeutels mit Seidengewebe
 - 5.760 kJ konnten bei einer Einsatzdauer von 8 Stunden eingespart werden

Verwendete Daten für die Entsorgung nach Einsatz des Produkts:

- Bei Einsatz in einem Serien-Filter aus Polypropylen wurde die Entsorgung über den Hausmüll angenommen

Gutschrift wegen Einsparung an üblicherweise verwendetem Material:

- Herstellung von 55 g Polypropylen inkl. Verarbeitung zu einem Vliesmaterial

Verwendete Datensätze:

- Datensätze für Herstellung des Spinnenseiden-Gewebes
 - Alle Datensätze für die Herstellung der Spinnenseide, wie oben beschrieben
 - Entsorgung des Spinnenseiden-Gewebes über „Entsorgung Bioabfall, 60% H₂O, in Kehrrechtverbrennung [CH]“
- generische Datensätze aus ecoInvent für Gutschrift Polypropylen:
 - Polypropylen Granulat ab Werk [RER]
 - Vliesherstellung Polyethylenterephthalat [RER]
 - Entsorgung Polypropylen, 15,9% H₂O, in Kehrrechtverbrennung [CH]
- generische Datensätze aus ecoInvent für Gutschrift Strom:
 - Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE, ab Netz [UCTE]

7 ERGEBNISSE DER BETRACHTUNG DER NACHHALTIGKEIT

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellierung in Kapitel 7.1 für die Herstellung eines Kilogramms Spinnenseide „cradle-to-gate“ und in Kapitel 7.2 für das Spinnenseiden-Gewebe „cradle-to-grave“ für die Lebensdauer eines Filters präsentiert.

7.1 Ergebnisse der Herstellung künstlicher Spinnenseide

7.1.1 Grundbetrachtung

7.1.1.1 Ergebnisse der Sachbilanz

In Tabelle 52 sind der In- und Output des gesamten Material- und Energieflusses zur Herstellung von 1 kg Spinnenseide aufgeführt.

Tabelle 52: Material- und Energiefluss für 1 kg Spinnenseide „cradle-to-gate“

Input	Menge	Einheit
Ammoniak 25%	6,68E-3	m ³
Antibiotika	5,09E-3	kg
Diammoniumhydrogenphosphat	0,582	kg
EDTA	1,22E-06	kg
Glucose	26,5	kg
Harnstoff	34,8	kg
IPTG	0,04	kg
Kaliumdihydrogenphosphat	1,94	kg
Magnesiumsulfat	4,84	kg
Natriumchlorid	0,81	kg
Natronhydroxid	1,21	kg
Salzsäure konz.	3,03E-3	m ³
Tris	0,839	kg
Wasser techn.	1,56	m ³
Zitronensäure	0,247	kg
Energie, elektrisch	184.000	kJ
Kühlenergie	448.000	kJ
Energie, thermisch	43.700	kJ
Druckluft	54,8	Nm ³
Dampf	1,75	kg
Behandlung Abwasser Ernte&Filtration	1,04	m ³
Beh. Abwasser Equipment-Reinigung	0,584	m ³

Output	Menge	Einheit
Protein getrocknet	1,00	kg
Kohlendioxid, biogen [Luft/allgemein]	22,6	kg
Wasser [Luft/allgemein]	11,5	kg
Harnstoff	33,5	kg
Wasser techn.	0,05	m ³
Lösung 2 (8M Harnstoff)	0,0924	m ³

In Abbildung 45 ist der Anteil von thermischer, elektrischer und Kühlenergie an der Gesamtenergie dargestellt. Die Kühlenergie hat mit 66% den größten Anteil.

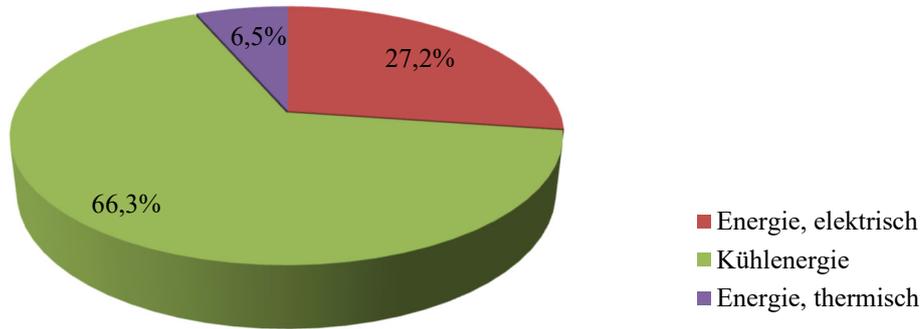


Abbildung 45: Anteil der Energien bei der Herstellung von 1 kg Spinnenseide „cradle-to-gate“

In Tabelle 53 ist die prozentuale Verteilung der Energien pro Prozessschritt dargestellt. Es zeigte sich, dass der Bedarf an elektrischer und Kühlenergie bei der Fermentation mit 85% am höchsten ist. Der Bedarf an thermischer Energie war bei der Filtration mit 49% am höchsten.

Tabelle 53: Prozentuale Verteilung der Energien nach Prozessschritt

Prozessschritt	Energie, elektrisch	Kühlenergie	Energie, thermisch
Medium	0,2%	0,0%	0,0%
Fermentation	85,1%	85,4%	23,6%
Puffer	0,2%	0,0%	0,0%
Ernte	6,2%	6,6%	0,0%
Zellaufschluss	4,6%	1,4%	0,0%
Filtration	1,4%	5,7%	48,8%
Sprühtrocknen	1,3%	0,4%	0,0%
SIP/CIP	0,1%	0,3%	27,6%
Reinigungslösung	0,1%	0,0%	0,0%
Behandlung Abwasser	0,7%	0,2%	0,0%

In Abbildung 46 ist die anteilige Verteilung der Energien für jeden Prozessschritt aufsummiert. Es zeigte sich, dass die Fermentation in Summe, die meiste Energie verbraucht.

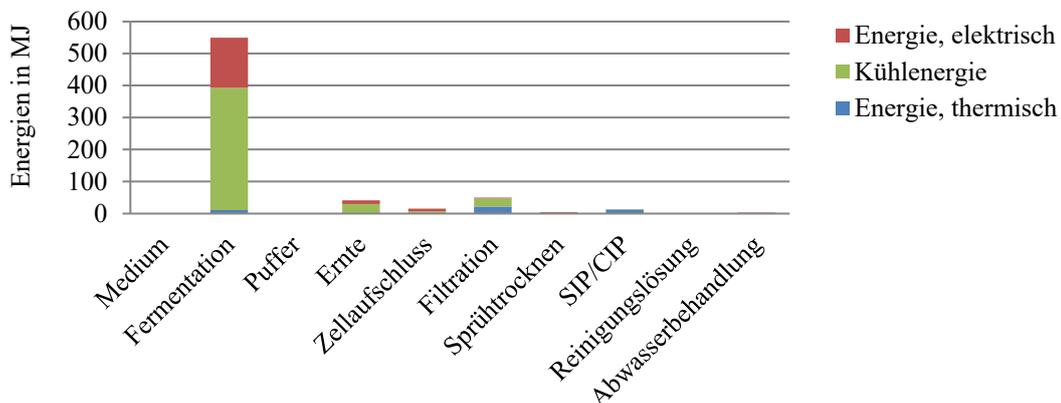


Abbildung 46: Verteilung der Energien nach Prozessschritt

7.1.1.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

7.1.1.2.1 Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseide

In Tabelle 54 sind die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung mit den verschiedenen Methoden dargestellt. Es zeigte sich, dass die CML- und IPCC-Methode für den Klimawandel immer den gleichen Wert lieferten. Ebenso war der Wert des stratosphärischen Ozonabbaus, ODP Gleichgewicht, für CML- und EDIP-Methode identisch. Es wurde deswegen im Weiteren auf eine parallele Auflistung der IPCC und EDIP-Werte verzichtet. Die Werte ohne Berücksichtigung der Langzeitfolgen von Emissionen wirkten sich nur bei den Wirkungskategorien des Überdüngungspotentials und den Toxizitätswerten der USEtox-Methode aus und wurden deswegen auch im Weiteren nicht parallel angegeben.

Tabelle 54: Ergebnisse für die Herstellung der Spinnenseide in den verschiedenen Wirkungskategorien und Methoden

Wirkungskategorie	Einheit	Mit Langzeitfolgen	Ohne Langzeitfolgen
CML2001			
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	95,5
Landverbrauch, Inanspruchnahme	m ²	27,3	27,3
Tief-NO _x POPC (Sommersmog)	kg Ethylen	7,2E-03	7,2E-03
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,66
Ozonabbau ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	1,5E-05
Versauerungspotential Generisch	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,77
Überdüngungspotential Generisch	kg PO ₄ -Eq	1,05	0,90
Kumulierter Energieaufwand			
Summe KEA	MJ-Eq	2.753	
IPCC Klimawandel			
GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	
EDIP Ozonabbau			
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	
USEtox Humantoxizität			
Total	CTU _h	2,87E-05	2,31E-05
USEtox Ökotoxizität			
Total	CTU _e	93,17	64,03

7.1.1.2.2 Einfluss des Harnstoff-Recyclings

Durch die Aufbereitung bzw. Rückgewinnung des Harnstoffs wurde davon weniger zur Bereitstellung für den Prozess benötigt. In Tabelle 52 ist beim Output zu sehen, dass 33,5 kg Harnstoff für die direkte Zugabe aufbereitet wurden, basierend auf der Annahme von 1,3 kg Verlust an Harnstoff durch die Aufbereitung (entspricht 3,7 %). Für die Bereitstellung der 8 M Harnstoff-Lösung für die Filtration wurden 44,3 kg eingespart und dabei 0,05 m³ techn.

Wasser zurückgeführt. In Tabelle 55 sind die prozentualen Anteile der Materialien ohne und mit Harnstoffaufbereitung dargestellt.

Tabelle 55: Prozentuale Verteilung in kg der Materialien (ohne techn. Wasser)

Prozessschritt	Prozentualer Anteil ohne Harnstoff Aufbereitung	Prozentualer Anteil mit Harnstoff Aufbereitung
Ammoniak 25%	0,01%	0,02%
Antibiotika	0,01%	0,01%
Diammoniumhydrogenphosphat	0,81%	1,52%
EDTA	0,00%	0,00%
Glucose	36,90%	69,10%
Harnstoff	48,45%	3,47%
IPTG	0,06%	0,10%
Kaliumdihydrogenphosphat	2,70%	5,06%
Magnesiumsulfat	6,74%	12,62%
Natriumchlorid	1,13%	2,11%
Natronhydroxid	1,68%	3,15%
Salzsäure konz.	4,63%	8,33%
Tris	1,17%	2,19%
Zitronensäure	0,34%	0,64%

Zur Beurteilung der Auswirkung des Recyclings des Harnstoffs wurde in der Modellierung das Recycling ausgesetzt und die Analyse in den Wirkungskategorien ermittelt. In Tabelle 57 wurde der durch das Recycling des Harnstoffs entstehende Vorteil dargestellt. Der Vorteil ergibt sich durch die Einsparung an Harnstoff als Feststoff und als Lösung bei der Filtration. Der Gesamtvorteil setzte sich aus der Einsparung von 77,8 kg Harnstoff, 11,5 MJ thermischer und 0,3 MJ elektrischer Energie, 0,06 m³ techn. Wasser für die Harnstoff-Lösung und der Einsparung der Entsorgung von 0,19 m³ harnstoffhaltigem Abwasser zusammen. Wird der Harnstoff aus dem harnstoffhaltigen Abwasser zurückgewonnen, ist dafür die im Vergleich geringe Menge von 1,3 MJ elektrischer Energie, 1 MJ Kühlenergie und 0,1 MJ thermischer Energie notwendig (Tabelle 56).

Tabelle 56: Einsparung und Mehraufwand durch Aufbereitung des Harnstoffs

Einsparung	Menge	Einheit
Harnstoff	+77,8	kg
Energie, thermisch	+11.500	kJ
Energie, elektrisch	+300	kJ
Wasser techn.	+0,06	m ³
Beh. Abwasser Harnstoff	+0,191	m ³
Mehraufwand	Menge	Einheit
Energie, elektrisch	-1.300	kJ
Kühlenergie	-1.000	kJ
Energie, thermisch	-100	kJ

In Tabelle 57 sind die Ergebnisse der Wirkungskategorien für den Vorteil der Harnstoff-Aufbereitung aufgeführt. In allen Wirkungskategorien wurden Emissionen eingespart, teilweise zu einem Vielfachen der Werte der Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseide, beim Klimawandel mit über 5-fach so hohen CO₂ Emissionen und mit 2-fach so hohen Werten beim kumulierten Energieaufwand. Diese Werte müssten der Herstellung der Spinnenseide aufaddiert werden, wenn der Harnstoff nicht im Prozess rückgewonnen wird. Die Aufbereitung des Harnstoffs ist somit in hohem Maße angeraten.

Tabelle 57: Vorteil des Recyclings von Harnstoff im Prozess im Vergleich zu der Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseiden

Wirkungskategorie	Einheit	Vorteil durch Harnstoff-Recycling	Gesamtbilanz Herstellung Spinnenseiden
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	534,6	95,5
Landverbrauch	m ²	0,2	27,3
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	2,7E-02	7,2E-03
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	2,45	0,66
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	4,2E-05	1,5E-05
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	16,41	0,77
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	3,42	1,05
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	5.550	2.753
Humantoxizität Total	CTU _h	4,1E-06	2,9E-05
Ökotoxizität Total	CTU _e	104,8	93,2

In Abbildung 47 sind die anteiligen Emissionen der an der Einsparung beteiligten Materialien und Energien der verschiedenen Wirkungskategorien abgebildet. Es zeigte sich, dass sich der Vorteil der Aufbereitung des Harnstoffs überwiegend aus der eingesparten Erzeugung und Entsorgung des Harnstoffs ergibt. Der Mehraufwand an elektrischer Energie und Kühlenergie durch Filtration zur Aufbereitung des harnstoffhaltigen Abwassers ist mit unter 1% sehr gering im Vergleich zu den Einsparungen bei der Bereitstellung und Entsorgung des Harnstoffs.

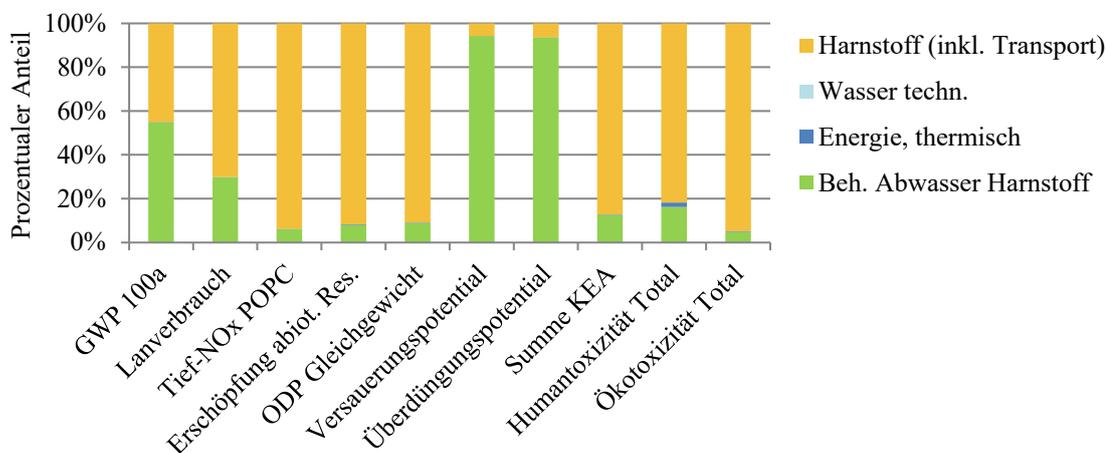


Abbildung 47: Einfluss der einzelnen Medien und Energien bei der Aufbereitung des Harnstoffs

7.1.1.2.3 Wirkungsabschätzung der eingesetzten Rohstoffe, Energien und Prozessmedien

In Tabelle 58 sind als ungewichtete, summierte prozentuale Anteile die Werte der Rohstoffe, Energien und Prozessmedien zusammengefasst. Deren detaillierte prozentuale Anteile an den Umweltwirkungen jeder Wirkungskategorie sind in Tabelle 59 dargestellt. Die größten Anteile an Emissionen der verschiedenen Wirkungskategorien haben Glucose, im Durchschnitt mit 27%, die Behandlung des Abwassers mit 20%, elektrische Energie mit 15% und Kühlenergie mit 14%. In Abbildung 48 sind die summierten Anteile der Rohstoffe graphisch dargestellt (siehe Seite 128).

Tabelle 58: Ungewichtete summierte prozentuale Anteile der Beiträge aller Rohstoffe, Energien und Prozessmedien in den betrachteten Wirkungskategorien

Rohstoff	Mittelwert	Rohstoff	Mittelwert
Ammoniak 25%	0%	Tris	2%
Ammoniumhydrogenphosphat	1%	Wasser techn.	0%
Antibiotika	1%	Zitronensäure	0%
EDTA	0%	Behandlung Abwasser	20%
Glucose	27%	Energie, elektrisch	15%
Harnstoff	3%	Kühlenergie	14%
IPTG	0%	Energie, thermisch	2%
Kaliumdihydrogenphosphat	6%	Druckluft	2%
Magnesiumsulfat	1%	Dampf	0%
Natriumchlorid	0%	Transport Fracht Lkw	0%
Natriumhydroxid	1%	Transport Fracht Schiene	2%
Salzsäure konz.	3%	Transport Frachter Übersee	0%

Tabelle 59: Prozentualer Anteil in den betrachteten Wirkungskategorien bei der Erzeugung aller Rohstoffe und Energien

Rohstoff	GWP 100a CO ₂ -Eq	Land- verbrauch m ²	Sommer- smog (Tief-NOx) Ethylen	Erschöpfung abiot. Res- sourcens Antimon	ODP Gleich- gewicht CFC-II	Versauerungs- potential Generisch SO ₂ -Eq	Überdüngungs- potential Generisch PO ₄ -Eq	KEA Gesamt MJ	Human- toxizität CTU _h	Öko- toxizität CTU _c
Ammoniak 25%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Ammoniumhydrogenphosphat	0,7%	0,0%	0,7%	0,7%	0,5%	1,4%	1,4%	0,4%	0,1%	0,3%
Antibiotika	0,2%	2,3%	0,4%	0,2%	0,1%	0,3%	0,1%	0,9%	1,3%	1,2%
EDTA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Glucose	5,0%	93,3%	11,6%	2,6%	3,2%	10,1%	2,2%	35,1%	54,9%	47,3%
Harnstoff	4,3%	0,0%	6,0%	5,8%	4,2%	2,1%	0,4%	3,0%	0,3%	2,1%
IPTG	0,2%	0,1%	0,8%	0,3%	0,2%	0,1%	0,0%	0,2%	0,2%	0,1%
Kaliumdihydrogenphosphat	3,9%	2,2%	4,1%	3,7%	2,1%	7,8%	3,4%	2,2%	9,2%	16,8%
Magnesiumsulfat	1,5%	0,0%	0,8%	1,6%	0,5%	0,9%	0,4%	1,1%	0,6%	0,8%
Natriumchlorid	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
Natriumhydroxid	1,3%	0,0%	0,7%	1,3%	0,5%	0,7%	0,4%	0,9%	2,5%	0,7%
Salzsäure konz.	2,3%	0,0%	1,5%	2,5%	16,6%	1,4%	0,6%	1,7%	3,2%	1,3%
Tris	2,5%	0,0%	3,2%	3,8%	3,0%	1,0%	0,3%	2,0%	0,3%	0,4%
Wasser techn.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Zitronensäure	0,4%	1,1%	0,3%	0,4%	0,1%	0,3%	0,1%	0,7%	0,8%	0,7%
Behandlung Abwasser	11,8%	0,2%	8,2%	5,7%	29,1%	43,0%	79,8%	5,8%	11,2%	8,0%
Energie, elektrisch	28,1%	0,6%	13,7%	29,7%	8,5%	15,4%	8,5%	20,9%	10,6%	14,7%
Kühlenergie	24,9%	0,0%	37,2%	28,8%	23,7%	2,9%	0,5%	17,1%	0,7%	0,8%
Energie, thermisch	4,1%	0,0%	2,7%	3,8%	3,2%	1,2%	0,1%	2,1%	1,9%	1,6%
Druckluft	4,7%	0,1%	2,3%	4,9%	1,4%	2,5%	1,4%	3,5%	1,8%	2,4%
Dampf	0,4%	0,0%	0,3%	0,5%	0,4%	0,1%	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%
Transport Fracht Lkw	0,7%	0,0%	0,4%	0,6%	0,6%	0,4%	0,0%	0,3%	0,1%	0,2%
Transport Fracht Schiene	2,5%	0,0%	4,3%	2,3%	1,9%	7,9%	0,5%	1,3%	0,2%	0,2%
Transport Frachter Übersee	0,6%	0,0%	0,7%	0,6%	0,3%	0,5%	0,2%	0,4%	0,2%	0,2%



In Tabelle 60 wurden die folgenden Materialien und Energien als Hauptverursacher der verschiedenen Wirkungskategorien zusammengefasst:

Tabelle 60: Größte Verursacher der Emissionen in den verschiedenen Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	Glucose	Elektr. Energie	Kühlenergie	Konz. HCl	KH ₂ PO ₄	Beh. Abwasser
Klimawandel GWP 100a		28%	25%			12%
Landverbrauch, Inanspruchn.	93%					
Sommersmog (Tief-NO_x)	12%	14%	37%			
Erschöpfung abiot. Ressourcen		30%	29%			
ODP Gleichgewicht			24%	17%		30%
Versauerungspotential Gen.	10%	15%				43%
Überdüngungspotential Gen.						80%
Energiebedarf Summe KEA	35%	21%	17%			
Humantoxizität Total	55%	11%				11%
Ökotoxizität Total	47%	15%			17%	

In Abbildung 48 sind die summierten Anteile aller betrachteten Wirkungskategorien dargestellt. Hierbei wurden bei der Herstellung der Glucose in Summe die höchsten Emissionen verursacht (Rang 1), gefolgt von der Behandlung des Abwassers (Rang 2), danach die Bereitstellung elektrischer Energie (Rang 3) und die Bereitstellung von Kühlenergie (Rang 4).

Zur Vereinfachung der Darstellung und der weiteren Diskussion der Ergebnisse wurden in Abbildung 49 die Wirkungskategorien summiert, die in der Literatur am häufigsten verwendet werden – GWP 100a, ODP Gleichgewicht, KEA Gesamt, Humantoxizität und Ökotoxizität. Von der Rangordnung der Verursachung von Emissionen der verwendeten Rohstoffe, Energien und Prozessmedien zeigte sich in der reduzierten Betrachtung die gleiche Tendenz, nur die Entsorgung des Abwassers verschob sich von Rang 2 auf Rang 4.

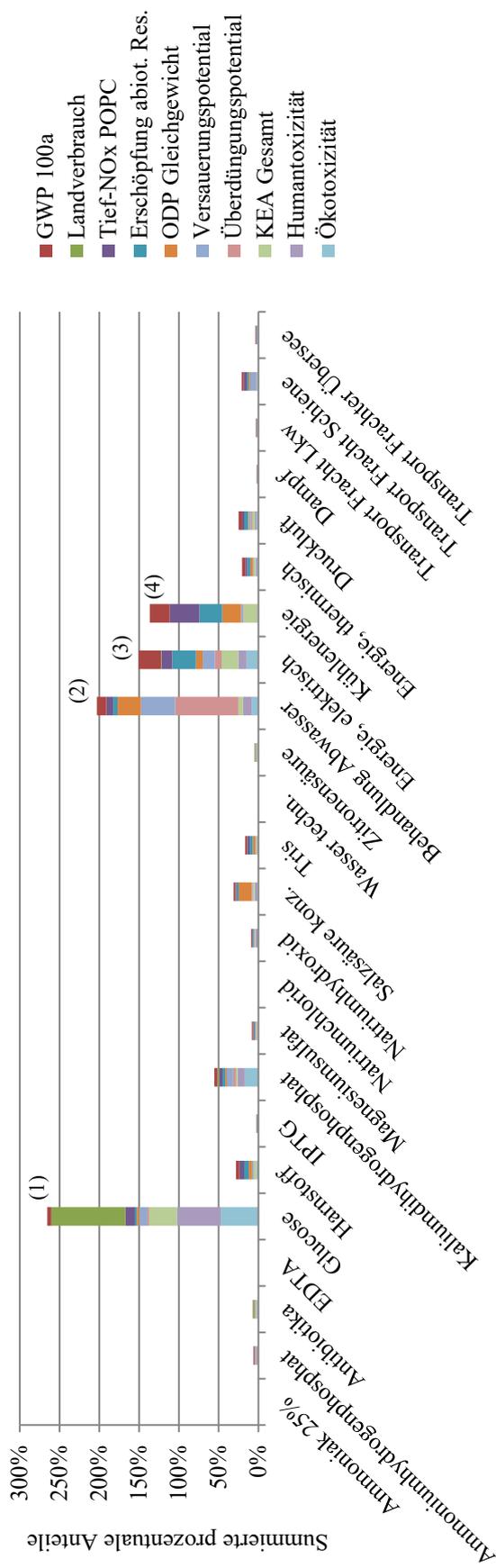


Abbildung 48: Summierte prozentuale Anteile der Rohstoffe in allen Wirkungskategorien

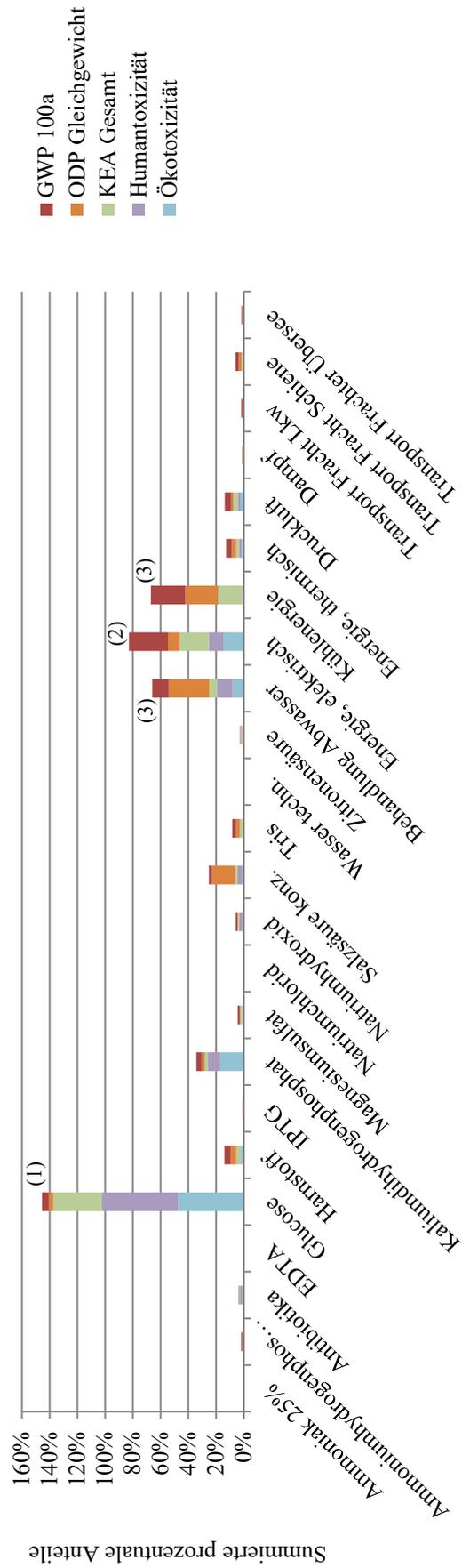


Abbildung 49: Summierte prozentuale Anteile der Rohstoffe in ausgewählten Wirkungskategorien

Aufwendungen für Abwasserentsorgung

Die Abwasserentsorgung lieferte in fast allen Wirkungskategorien einen großen Beitrag. Diese setzte sich für 1 kg Spinnenseide aus der Entsorgung von 1,04 m³ Abwasser der Filtration und Ernte und aus 0,58 m³ Abwasser der Equipment-Reinigung zusammen. Den weitaus höheren Anteil in den Wirkungskategorien lieferte die Entsorgung des Abwassers aus Filtration und Ernte (siehe Tabelle 61). Die Entsorgung des Abwassers der Equipment-Reinigung betrug, bis auf 20% beim Landverbrauch pro m³ Abwasser, im Durchschnitt nur 5% der Aufwendungen der Entsorgung des Abwassers der Ernte und Filtration. Die Größe des Landverbrauchs im Vergleich zum Abwasser der Ernte und Filtration erklärt sich dadurch, dass beim stärker verdünnten Abwasser, wie dem der Equipment-Reinigung, das Verhältnis von Verunreinigung zu Volumen kleiner ist und dadurch die begleitende Peripherie der Kläranlage mehr bei der Auswertung der Wirkungskategorien ins Gewicht fällt.

Tabelle 61: Abwassermodule im Vergleich

Wirkungskategorie	Einheit	Behandlung Abwasser Ernte & Filtration pro m ³	Behandlung Abwasser Equipment- Reinigung pro m ³	% Equipment- Reinigung von Ernte & Filtration
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	10,64	0,30	2,8%
Landverbrauch	m ²	5,1E-02	1,0E-02	19,6%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	5,3E-04	5,0E-05	9,4%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	3,5E-02	1,4E-03	4,0%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	4,3E-06	1,3E-08	0,3%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,32	8,2E-04	0,3%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	8,0E-01	2,9E-04	0,0%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	152,4	3,4	2,2%
Humantoxizität Total	CTU _h	3,0E-06	1,2E-07	4,1%
Ökotoxizität Total	CTU _e	6,9E+00	4,6E-01	6,6%

Einfluss je nach Einsatz im Prozess

In Abbildung 50 sind die prozentualen Anteile der Emissionen nach ihrer Verwendung im Herstellungsprozess in den verschiedenen Wirkungskategorien der Rohstoffe und Energien sortiert und aufsummiert. Es zeigte sich, dass die Rohstoffe für die Fermentation 6-fach so hohe Emissionen, wie die der Proteinreinigung verursachen, und 10-fach so hohe Emissionen, wie jene der Equipment-Reinigung. Die Wiederverwendung des Harnstoffs bei der Proteinreinigung ist hier durch dessen Aufbereitung schon berücksichtigt.

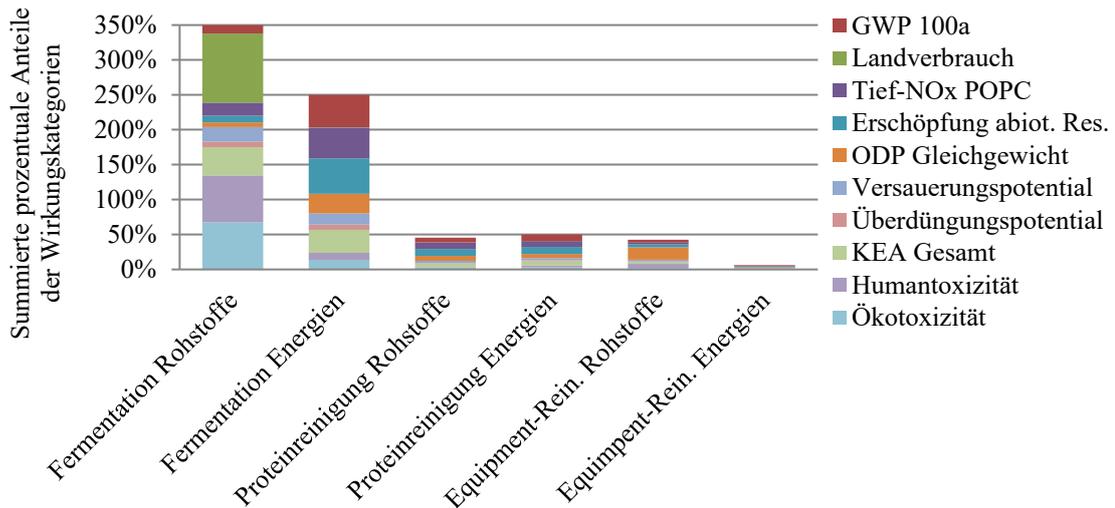


Abbildung 50: Gliederung der Anteile des Rohstoff- und Energieeinsatzes in den Wirkungskategorien nach Einsatz im Prozess

Einfluss von Transportaufwendungen

In Tabelle 62 sind die Anteile an den Gesamtemissionen in den verschiedenen Wirkungskategorien der verschiedenen Transportaufwendungen, Lkw, Schiene sowie Frachter Übersee aufgeführt. Es wurden in Summe für die Herstellung eines kg Spinnenseide für den Transport von 47,5 kg Rohstoffen zum Produktionsort 4,75 tkm Transport Lkw, 19,2 tkm Transport Schiene und 265,0 tkm Transport Frachter Übersee benötigt (Transport Frachter Übersee fällt nur für Glucose an).

Tabelle 62: Anteil des Transports an den Gesamtemissionen

Wirkungskategorie	Einheit	Transport Fracht Lkw	Transport Fracht Schiene	Transport Frachter Übersee	Transport Gesamt
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	0,67%	2,47%	0,58%	3,72%
Landverbrauch	m ²	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	0,43%	4,28%	0,71%	5,42%
Erschöpfung abiot. Res.	kg Antimon	0,60%	2,30%	0,59%	3,49%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	0,64%	1,98%	0,26%	2,88%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,38%	7,90%	0,48%	8,75%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,05%	0,50%	0,16%	0,70%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	0,33%	1,26%	0,39%	1,98%
Humantoxizität Total	CTU _h	0,07%	0,16%	0,16%	0,39%
Ökotoxizität Total	CTU _e	0,18%	0,21%	0,23%	0,61%

7.1.1.2.4 Fehleranalyse der verschiedenen Rohstoffe, Energien und Prozessmedien

Einfluss durch Ungenauigkeiten bei der Erstellung von Datensätzen

Zur Beurteilung des Einflusses von Ungenauigkeiten bei der Erstellung der Datensätze mancher Rohstoffe über chemische Synthese vorhandener Rohstoffe wird über die Berücksichti-

gung eines niedrigen und hohen prozentualen Fehlers die Fehlerfortpflanzung gerechnet. In Tabelle 63 sind die Materialien aufgeführt, die über chemische Synthese vorhandener Rohstoffe simuliert werden mussten. Die dazugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 51 dargestellt. Ein Fehler von 20% bei den durch chemische Synthese simulierten Rohstoffen führte in Summe zu einem hohen Einfluss von 13% in den Wirkungskategorien Human- und Ökotoxizität, hatte jedoch nur einen geringen Einfluss von 2% auf die Wirkungskategorie Klimawandel. Der hohe Einfluss von 20% beim Landverbrauch ergab sich durch Glucose mit 93% Anteil in dieser Wirkungskategorie.

Tabelle 63: Faktoren für die Fehlerbetrachtung für Materialien über chemische Synthese aus ecoInvent-Modulen

Rohstoff	„Fehler klein“	„Fehler groß“
Glucose		
Kaliumdihydrogenphosphat		
Tris	5%	20%
IPTG		
Antibiotika		
Zitronensäure		

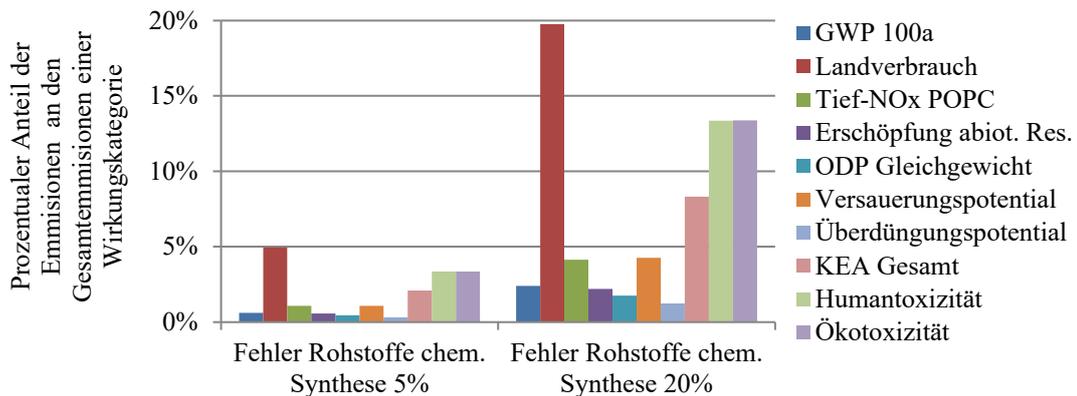


Abbildung 51: Fehlerbetrachtung für Materialien über chemische Synthese aus ecoInvent-Modulen

Einfluss durch die Verwendung alternativer ecoInvent-Module

Wegen ihres hohen Einflusses bei der Auswertung in den Wirkungskategorien sollte bei Glucose sowie elektrischer und thermischer Energie der Einfluss der Verwendung anderer ecoInvent-Module betrachtet werden. Kühlenergie und die Abwasserbehandlung, die ebenfalls hohe Anteile an den Emissionen der verschiedenen Wirkungskategorien haben, konnten nicht untersucht werden, da für diese Module keine anderen Datensätze zur Verfügung standen.

Für Glucose wurde statt „Zucker, aus Zuckerrohr [BR]“ der Datensatz „Zucker, aus Zuckerrüben [CH]“ in der Modellierung verwendet. Beim Schweizer Zucker-Datensatz wurde im Vergleich zum brasilianischen Zucker der Überseetransport eingespart. In Tabelle 64 ist die Wirkungsabschätzung als Gegenüberstellung der Datensätze aufgeführt. Für die Herstellung

von 1 kg Spinnenseide waren 26,5 kg Zucker notwendig. Bei der Verwendung des Datensatzes für Zucker aus Zuckerrüben verdoppelten sich die Werte des Klimawandels im Vergleich zum Zucker aus Zuckerrohr. Nur im Bereich der Human- und Ökotoxizität sowie beim Sommersmog lieferte der Zucker aus Zuckerrüben bessere Ergebnisse.

Tabelle 64: Gegenüberstellung der ecoInvent-Module für Zucker

Wirkungskategorie	Einheit	Zucker Zucker- rohr	Zucker Zucker- rübe	Differenz
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	5,32	12,22	-6,90
Landverbrauch	m ²	25,44	24,43	1,01
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	8,8E-04	5,5E-04	3,3E-04
Erschöpfung abiot. Res.	kg Antimon	0,02	0,05	-0,03
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	5,4E-07	1,0E-06	-4,8E-07
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,08	0,10	-0,02
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,03	0,07	-0,05
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	977	748	230
Humantoxizität Total	CTU _h	1,58E-05	1,94E-07	1,56E-05
Ökotoxizität Total	CTU _e	44,32	10,48	33,85

Für elektrische und thermische Energie wurden die Datensätze für Strom und Wärme erzeugt durch ein Mini-BHKW in Vergleich zu den verwendeten Datensätzen „Strom, Produktion UCTE“ und „Nutzwärme, Heizöl EL“ in der Modellierung verwendet. In Tabelle 65 sind Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt. Es wurde für die Herstellung von 1 kg Spinnenseide 18,4 MJ elektrische Energie und 91,8 MJ thermische Energie benötigt. Die Verwendung von Strom und Wärme eines Mini-BHKW ist gegenüber „Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE“ und „Nutzwärme, Heizöl EL“ in allen Wirkungskategorien, bis auf Sommersmog und Ozonabbau, vorzuziehen.

Tabelle 65: Gegenüberstellung der ecoInvent-Module für Strom und Wärme

Wirkungskategorie	Einheit	Strom UCTE + Wärme Heizöl	Strom & Wärme Mini- BHKW	Differenz
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	30,69	22,34	8,35
Landverbrauch	m ²	0,16	0,00	0,16
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	1,2E-03	3,6E-03	-2,4E-03
Erschöpfung abiot. Res.	kg Antimon	0,22	0,18	0,04
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,8E-06	3,4E-06	-1,6E-06
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,13	0,02	0,11
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,09	0,00	0,09
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	634	368	266
Humantoxizität Total	CTU _h	3,58E-06	2,17E-08	3,55E-06
Ökotoxizität Total	CTU _e	15,14	0,02	15,12

Einfluss durch Ungenauigkeiten bei der Prozessplanung

Für eine Abschätzung der Ungenauigkeit bei der Prozessbetrachtung und Anlagenauslegung bezüglich Rohstoffeinsatz und Energiebedarf auf die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, wurden die Prozessschritte Fermentation, Ernte, Filtration und SIP/CIP untersucht. Mit den in Tabelle 66 angegebenen, abgeschätzten Werten konnte der Einfluss simuliert werden.

Die meisten Materialien konnten nur einem Prozessschritt zugeordnet werden. Techn. Wasser, Natriumhydroxid und Salzsäure verteilten sich auf verschiedene Prozessschritte und wurden mit ihrer anteiligen Verteilung angegeben. Der Einfluss des Verbrauchs an techn. Wasser bei der Ernte war im Vergleich zum Gesamtergebnis der Wirkungsabschätzung so gering, dass in Abbildung 52 keine Werte angezeigt werden. Den größten Einfluss hatten die Rohstoffe der Fermentation, jedoch nur beim Landverbrauch mit einem Wert von 20%, was auf Glucose mit 93% anteiligem Wert in dieser Wirkungskategorie zurückzuführen war (Abbildung 52 und Abbildung 53).

Tabelle 66: Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung bezüglich des Materialbedarfs

Prozessschritt	Betrachtete Abweichung der Rohstoffmodule	Anteil an techn. Wasser	Anteil an NaOH/HCl
Fermentation	±20%	5%	0%
Ernte	±5%	21%	0%
Filtration	±20%	37%	23%
SIP/CIP	±5%	37%	76%

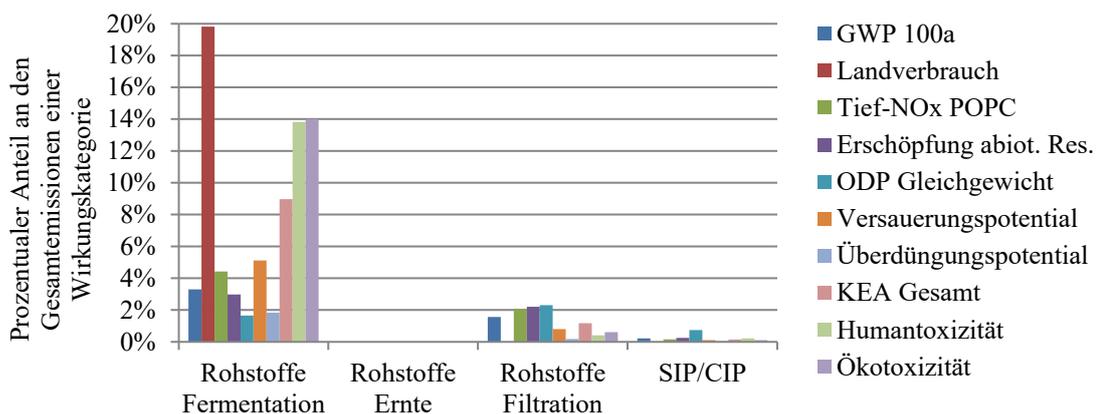


Abbildung 52: Prozentuale Anteile an den Gesamtemissionen einer Wirkungskategorie durch den Materialbedarf für Fermentation, Ernte, Filtration und SIP/CIP

Rohstoffe Fermentation: Kaliumdihydrogenphosphat, Magnesiumsulfat, Ammoniumdihydrogenphosphat, IPTG, Ammoniak, Antibiotika, Glucose, EDTA, Druckluft, Zitronensäure, Glucose und 5% Anteil techn. Wasser. Bei der Ernte wurde betrachtet: 21% Anteil techn. Wasser. Rohstoffe Filtration: Tris, Natriumchlorid, Harnstoff, 23% Anteil Natriumhydroxid, 23% Anteil konz. Salzsäure, 37% Anteil techn. Wasser. Rohstoffe SIP/CIP: 76% Anteil Natriumhydroxid, 76% Anteil konz. Salzsäure, 37% Anteil techn. Wasser.

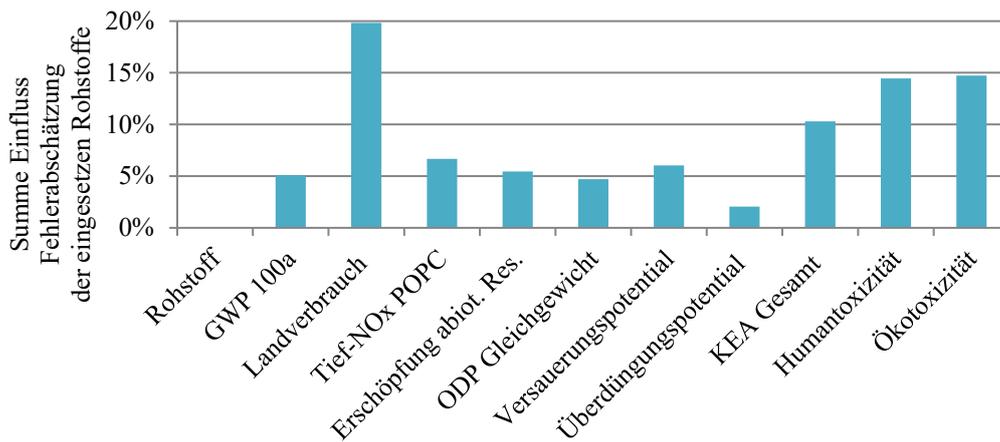


Abbildung 53: Summe des Einflusses des abgeschätzten Fehlers bei der Prozessauslegung auf die Wirkungsabschätzung bei der Betrachtung der eingesetzten Rohstoffe für Fermentation, Ernte, Filtration und CIP/SIP

Analog zum Rohstoffeinsatz wurde die Ungenauigkeit der Abschätzung des Energiebedarfs untersucht. In Tabelle 67 ist die geschätzte mittlere Abweichung der Energien dargestellt, diese wurde basierend auf den durchgeführten Berechnungen als hoch, mit 15% möglicher Abweichung bei elektrischer Energie, angenommen – da für deren Berechnung einfach abgeschätzt 70% des notwendigen Anschlusswertes als Basis herangezogen wurden –, als niedrig mit 5% bei thermischer Energie – da hier eine umfangreiche Berechnung über die Behältergröße durchgeführt wurde – und eine mittlere Abweichung von 8,3% bei Kühlenergie – hier ebenfalls über eine umfangreiche Rechnung abgeschätzt, aber Wärmeverluste ggfs. nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

Tabelle 67: Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung bezüglich der Energien

Energien	Geschätzte mittlere Abweichung
Energie, elektrisch	±15%
Energie, thermisch	±5%
Kühlenergie	±8,3%

In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind die Ergebnisse des Einflusses der angesetzten Abweichungen auf die Wirkungsabschätzung dargestellt. Der Einfluss war für elektrische Energie, gefolgt vom Einfluss der Kühlenergie, am höchsten. Der Einfluss der thermischen Energie war entsprechend der geschätzten Ungenauigkeiten am geringsten.

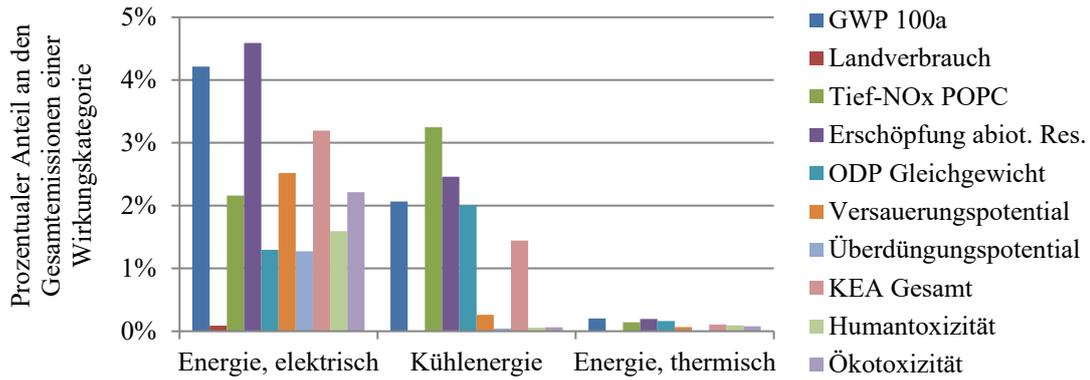


Abbildung 54: Prozentuale Anteile an den Gesamtemissionen einer Wirkungskategorie durch Bereitstellung der verschiedenen Energien

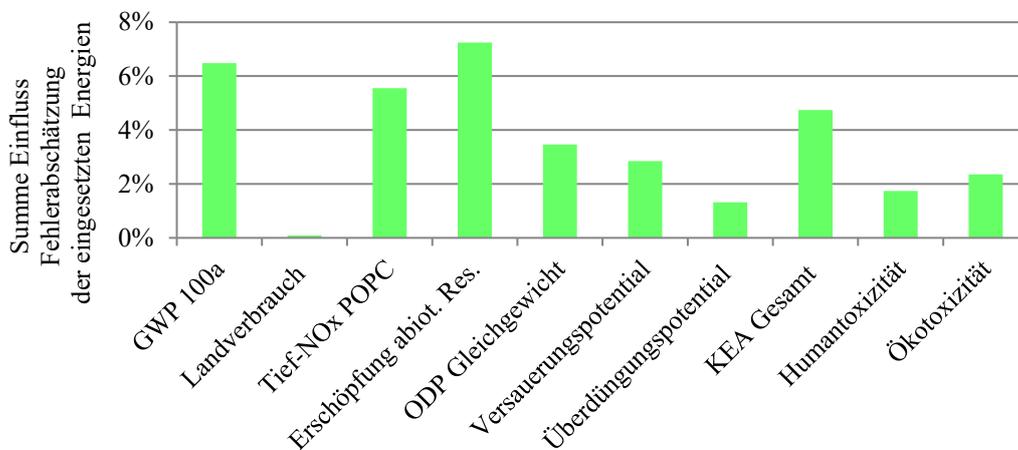


Abbildung 55: Summe des Einflusses des abgeschätzten Fehlers bei der Prozessauslegung auf die Wirkungsabschätzung bei der Betrachtung der Bereitstellung der verschiedenen Energien

In Tabelle 68 sind die Einflüsse der abgeschätzten Ungenauigkeiten jeweils für Rohstoffe und Energien aufsummiert und in Abbildung 56 dargestellt. Die Ungenauigkeit bei der Abschätzung des Rohstoffbedarfs hatte, ausgenommen dem Klimawandel und der Erschöpfung abiotischer Ressourcen, in allen Wirkungskategorien einen größeren Beitrag als die Ungenauigkeit bei der Abschätzung der Energien. In den Wirkungskategorien Klimawandel, Tief-NOx, Erschöpfung abiotischer Ressourcen und ODP Gleichgewicht ist der Einfluss in etwa vergleichbar (Abbildung 56, 1). In den Wirkungskategorien Versauerungspotential, Überdüngungspotential und KEA Gesamt ist der Einfluss der Ungenauigkeit der Abschätzung des Rohstoffbedarfs etwa doppelt so hoch, als die Ungenauigkeit der Abschätzung der Energien (Abbildung 56, 2). In den Wirkungskategorien Landverbrauch, Human- und Ökotoxizität ist der Einfluss der Ungenauigkeit der Abschätzung des Rohstoffbedarfs deutlich höher als die Ungenauigkeit der Abschätzung der Energien (Abbildung 56, 3).

Tabelle 68: Zusammenfassung des Einflusses der Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung

Wirkungskategorie	Einheit	Summe Einfluss Fehlerabschätzung Rohstoffe	Summe Einfluss Fehlerabschätzung Energien
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	5,1%	6,5%
Landverbrauch	m ²	19,8%	0,1%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	6,7%	5,5%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	5,4%	7,2%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	4,7%	3,5%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	6,0%	2,8%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	2,1%	1,3%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	10,3%	4,7%
Humantoxizität Total	CTU _h	14,4%	1,7%
Ökotoxizität Total	CTU _e	14,7%	2,4%

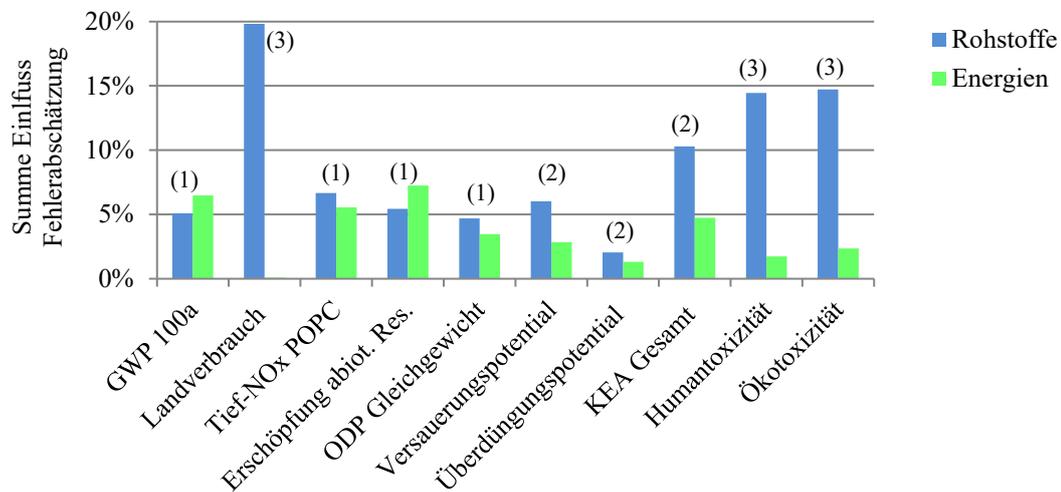


Abbildung 56: Zusammenfassung des Einflusses der Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung auf die Wirkungsabschätzung

7.1.1.2.5 Sensitivitätsanalyse und daraus resultierende Empfehlungen

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zur Identifizierung sogenannter „Hot spots“ wurde abgeleitet, welche Rohstoffe hinsichtlich ihrer Masse und ihres Einflusses in ausgewählten Wirkungskategorien die größten Auswirkung auf die Umweltverträglichkeit haben (Tabelle 69):

- In Massenanteilen wurde mit 63% am meisten Glucose benötigt. In den Wirkungskategorie Klimawandel und Ozonabbau ist deren Einfluss jedoch nur 22% sowie 10%. Beim kumulierten Energieaufwand (KEA) wurden jeweils zwischen 66% und 75% durch die Herstellung von Glucose verursacht.
- Die Bereitstellung von Harnstoff hatte, obwohl es von den Massenprozent nur 3,2% darstellt, einen Anteil von 19% beim Klimawandel und 13% beim Ozonabbau.
- Konzentrierte Salzsäure trug mit 53% beim Ozonabbau einen sehr hohen Anteil im Vergleich zu ihren anteiligen 8 Massenprozent.

- Kaliumdihydrogenphosphat verursachte einen höheren Anteil in allen Wirkungskategorien als sein Anteil in Massenprozent.

Tabelle 69: Vergleich des Massenanteils der Rohstoffe zur Produktion rekombinanter Spinnenseide mit deren Einfluss in ausgewählten Wirkungskategorien

Rohstoff	Massenanteil [kg]	Klimawandel [CO ₂]	Ozonabbau [CFC]	KEA [MJ]	Human-tox. [CTU _h]	Öko-tox. [CTU _e]
Ammoniak 25%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Antibiotika	0,0%	1,1%	0,4%	1,9%	1,8%	1,7%
Diammoniumhydrogenphosphat	1,4%	3,0%	1,6%	0,8%	0,2%	0,4%
EDTA	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Glucose	63,3%	22,3%	10,4%	72,6%	74,6%	65,9%
Harnstoff	3,2%	19,2%	13,5%	6,2%	0,5%	2,9%
IPTG	0,1%	0,8%	0,5%	0,5%	0,3%	0,2%
Kaliumdihydrogenphosphat	4,6%	17,3%	6,7%	4,5%	12,6%	23,5%
Magnesiumsulfat	11,6%	6,6%	1,5%	2,3%	0,8%	1,1%
Natriumchlorid	1,9%	0,5%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Natronhydroxid	2,9%	5,7%	1,5%	1,9%	3,4%	1,0%
Salzsäure konz.	8,3%	10,5%	53,5%	3,5%	4,4%	1,8%
Tris	2,0%	11,0%	9,7%	4,2%	0,4%	0,6%
Zitronensäure	0,6%	1,9%	0,5%	1,4%	1,0%	1,0%

Aus den in Tabelle 69 dargestellten Ergebnissen konnte abgeleitet werden, dass es im Zuge einer Prozessoptimierung empfehlenswert wäre, die angestrebten Änderungen durch eine begleitende Betrachtung des Einflusses in den verschiedenen Wirkungskategorien zu untersuchen. So kann eine Reduzierung der Glucosezufuhr bei der Fermentation in einem erhöhten Bedarf an Salzen, wie Kaliumdihydrogenphosphat oder Magnesiumsulfat resultieren und somit einen negativen Einfluss auf die Umweltverträglichkeit haben. Bei der Prozessoptimierung sollte deshalb das Gesamtsystem betrachtet werden, um final eine tatsächliche Reduzierung der Gesamtemissionen zu erreichen.

Eine Möglichkeit die Gesamtemissionen bei der Fermentation zu reduzieren, wäre die Verwendung von z.B. Vorstoffen der Zuckerherstellung, wie z.B. Bagasse oder Vinasse. Diese enthalten neben Zucker in geringer Konzentration neben dem Endprodukt „Zucker“ ebenfalls andere Stoffe, die als Nährstoffe für *E. coli* Bakterien bei der Fermentation dienen können. Dadurch könnte der Bedarf an Salzen und Spurenelementen bei der Fermentation stark reduziert werden. Der notwendige Entwicklungsaufwand für die Verwendung von Vorstoffen der Zuckerherstellung sollte ausreichend einkalkuliert werden. Leider gab es zum Zeitpunkt der Erstellung der ökobilanziellen Betrachtung kein geeignetes ecoInvent-Modul für einen Vorstoff der Zuckerherstellung, um dessen Auswirkung auf die Gesamtemissionen zu untersuchen zu können.

Bei der Auswertung der Ergebnisse zeigte sich ebenso, dass die Rohstoffe für die Fermentation 6-fach so hohe Emissionen wie die der Proteinreinigung verursachen, und 10-fach so hohe Emissionen, wie die der Equipment-Reinigung (die Wiederverwendung des Harnstoffs bei der Proteinreinigung durch dessen Aufbereitung wurde hierbei bereits berücksichtigt). Der Bedarf an elektrischer Energie und Kühlenergie war bei der Fermentation mit 85% am höchsten. Der Bedarf an thermischer Energie war bei der Filtration mit 49% am höchsten. Um eine Verbesserung der Umweltverträglichkeit des Produktionsprozesses von Spinnenseide zu erreichen, empfiehlt sich demnach im ersten Schritt die Optimierung der Fermentation und im zweiten Schritt die Optimierung der Filtration.

7.1.2 Ergebnisse der Gutschrift zur Entsorgung des Abwassers

7.1.2.1 Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Als Variante der Entsorgung des Abwassers über die Kläranlage wurde eine Aufbereitung des Abwassers betrachtet. Mittels Filtration sollte das Abwasser konzentriert und das für den Prozess notwendige techn. Wasser aufbereitet, sowie die konzentrierte nährstoffreiche Abwasserfraktion als Düngemittel weiterverwendet werden. Ebenso sollte das Abwasser der Equipment-Reinigung mittels Filtration konzentriert und techn. Wasser für den Prozess aufbereitet werden, wodurch eine konzentrierte Natriumchlorid-Lösung aus der Neutralisation von Natronlauge mit Salzsäure entstehen würde. Für diese Filtration wäre elektrische Energie und Kühlenergie notwendig. Das Abwasser, für welches die Weiterverwendung als Düngemittel angenommen wurde, sollte mit Dampf autoklaviert werden. In Tabelle 70 sind die Einsparungen, der Mehraufwand und die vorgenommenen Gutschriften aufgelistet.

Tabelle 70: Einsparung, Mehraufwand und Allokationen durch Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittels

Einsparung	Menge	Einheit	
Techn. Wasser	1,19	kg	
Entsorgung Abwasser	1,62	m ³	
Mehraufwand	Menge	Einheit	
Energie, elektrisch	12.000	kJ	
Kühlenergie	10.000	kJ	
Dampf	8,35	kg	
Allokationen	Menge	Einheit	Allokationsfaktor
Nährstoffe als Düngemittel	9,70	kg	50 %
Natriumchlorid in Lösung	2,45	kg	100 %
Emissionen Landwirtschaft	8,55	kg	50%

Für die Gutschrift als Düngemittel wurde die nährstoffreiche Abwasserfraktion betrachtet. Dazu gehörten die Nährstoffe, die bei der Fermentation eingesetzt werden, wie 25%ige Ammoniaklösung, Diammoniumhydrogenphosphat, Kaliumdihydrogenphosphat, Magnesiumsulfat, Zitronensäure und, die ebenfalls für eine Düngung interessanten Rohstoffe der Proteinreinigung, Harnstoff und Natriumchlorid. Bei der Betrachtung wurden die Transportaufwendungen der Rohstoffe zum Produktionsgebäude zu 100% berücksichtigt. Der Transport zur Weiterverwendung wurde zu 100% dem Folgeprozess zugeschrieben und nicht berücksichtigt. Die Emissionen der im Abwasser enthaltenen Stoffe wurden zu 50% als Emission Boden/Landwirtschaft dem Spinnenseidenprozess zugeschrieben. Die Aufwendungen für die Natriumchlorid-Lösung wurden dem Spinnenseidenprozess zu 100% gutgeschrieben. In Tabelle 71 ist das Ergebnis der Gutschrift und die prozentuale Einsparung im Vergleich zum Herstellungsprozess der Spinnenseide abgebildet. Durch die Gutschrift ergab sich in allen Wirkungskategorien, außer beim Überdüngungspotential, eine Verringerung der Emissionen. Die Mehrbelastung durch die Gutschrift betrug beim Überdüngungspotential fast 40%, obwohl die Behandlung des Abwassers, welches in dieser Kategorie 80% der Emissionen bewirkt, wegfiel. Den geringsten Effekt hatte die Gutschrift auf den Landverbrauch mit 1,3% Einsparung (diese Kategorie wird mit 93% des Gesamtwertes von Glucose dominiert), die größte Einsparung ergab sich beim Versauerungspotential (durch die Einsparung von 43% der Gesamtemission durch die Behandlung des Abwassers und die Gutschrift von 4% der Gesamtemissionen der Herstellung von Kaliumdihydrogenphosphat).

Tabelle 71: Einfluss auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung bei der Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittelauf

Wirkungskategorie	Einheit	Herstellung Spinnenseide	Herstellung Spinnenseide mit Gutschrift	Prozentuale Einsparung durch Gutschrift
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	89,3	-6,5%
Landverbrauch	m ²	27,3	26,9	-1,3%
Sommersmog (Tief-NO_x)	kg Ethylen	7,2E-03	6,7E-03	-6,2%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,67	0,4%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	1,2E-05	-24,8%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,42	-45,8%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	1,47	39,8%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2.680	-2,7%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	2,5E-05	-11,7%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	83,3	-10,6%

In Tabelle 72 sind die prozentualen Anteile der Zusammensetzung der an der Gutschrift beteiligten Materialien und Energien in jeder Wirkungskategorie aufgelistet, in Abbildung 57 sind

die Werte graphisch dargestellt. Den größten Anteil an der Gesamteinsparung ergab sich aus der Einsparung der Abwasserbehandlung und die Gutschrift der Rohstoffe. Den größten Einfluss auf das Ergebnis des Überdüngungspotentials hatte die Allokation der Emissionen durch Ausbringung des Düngemittels auf dem Feld.

Tabelle 72: Anteile der an der Gutschrift beteiligten Rohstoffe, Energien und Medien zur Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittel

Wirkungskategorie	Dampf	Elektrische Energie	Kühlenergie	Emissionen Landwirtschaft
Klimawandel GWP 100a	+29,7%	+7,5%	+1,8%	0,0%
Landverbrauch	+0,2%	+1,8%	+0,0%	0,0%
Sommersmog (Tief-NOx)	+29,6%	+4,8%	+3,5%	0,0%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	+40,1%	+9,3%	+2,4%	0,0%
ODP Gleichgewicht	+17,3%	+1,5%	+1,2%	0,0%
Versauerungspotential	+1,0%	+0,5%	+0,0%	+76,0%
Überdüngungspotential	+0,2%	+0,7%	+0,0%	0,0%
Energiebedarf Summe KEA	+29,6%	+9,6%	+2,1%	0,0%
Humantoxizität Total	+1,6%	+3,6%	+0,1%	+16,4%
Ökotoxizität Total	+11,4%	+4,1%	+0,1%	+13,1%

Wirkungskategorie	Behandlung Abwasser	Gutschrift Rohstoffe	Gutschrift NaCl-Lösung	Wasser techn.
Klimawandel GWP 100a	-43,3%	-19,1%	-0,3%	0,0%
Landverbrauch	-9,1%	-88,8%	0,0%	0,0%
Sommersmog (Tief-NOx)	-39,6%	-25,7%	-0,3%	0,0%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	-24,3%	-25,8%	-0,4%	0,0%
ODP Gleichgewicht	-72,1%	-9,0%	-0,1%	0,0%
Versauerungspotential	-19,6%	-2,9%	0,0%	0,0%
Überdüngungspotential	-95,6%	-3,5%	0,0%	0,0%
Energiebedarf Summe KEA	-36,5%	-23,9%	-0,4%	0,0%
Humantoxizität Total	-51,9%	-26,4%	-0,1%	0,0%
Ökotoxizität Total	-30,6%	-40,6%	-0,2%	0,0%

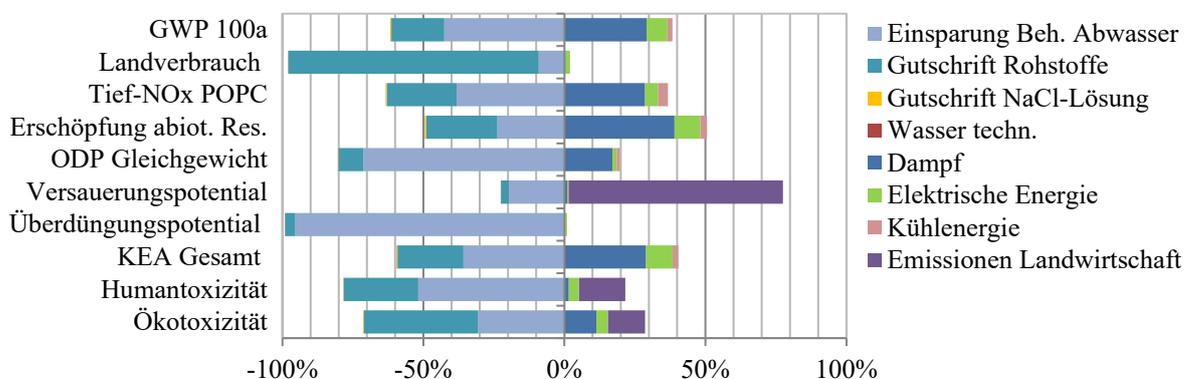


Abbildung 57: Zusammensetzung der Gutschrift bei Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittel

Negative Werte auf der x-Achse entsprechen der Einsparung (zu favorisieren), positive Werte dem Mehraufwand (zu verringern)

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die zwei Gutschriften „Düngemittel“ und „Natriumchlorid-Lösung“ separat betrachtet, da sich für die Gutschrift der Natriumchlorid-Lösung, die sich aus der Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung ableitet, keine großen Vorteile bei der Betrachtung der Wirkungskategorien abzeichneten. In Tabelle 73 sind die Anteile der Abwasseraufbereitung der Equipment-Reinigung aufgeführt. Die Einsparung der Behandlung des Abwassers der Equipment-Reinigung wurden mit den Anteilen aus Tabelle 73 berechnet, die sich aus den Abwasseranteilen ergeben. In Tabelle 74 ist das Ergebnis der Wirkungsabschätzung der Gutschrift „Natriumchlorid-Lösung“ und in Abbildung 58 die Anteile der an der Gutschrift beteiligten Materialien und Energien dargestellt.

Tabelle 73: Anteile der Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung

Energien und Medien	Anteil	Menge	Einheit
Techn. Wasser	45,6%	0,54	m ³
Energie, elektrisch	35,9%	4.308	kJ
Kühlenergie	35,9%	3.590	kJ

Tabelle 74: Einfluss der Gutschrift „NaCl-Lösung“ auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung

Wirkungskategorie	Einheit	Herstellung Spinnenseide	Herstellung Spinnenseide mit Gutschrift	Prozentuale Einsparung durch Gutschrift
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	95,9	+0,49%
Landverbrauch	m ²	27,3	27,3	-0,03%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	7,2E-03	0,0	-0,20%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,7	+0,66%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	0,0	+0,25%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,8	+0,24%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	1,1	+0,21%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2766,3	+0,48%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	0,0	-0,20%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	93,0	-0,20%

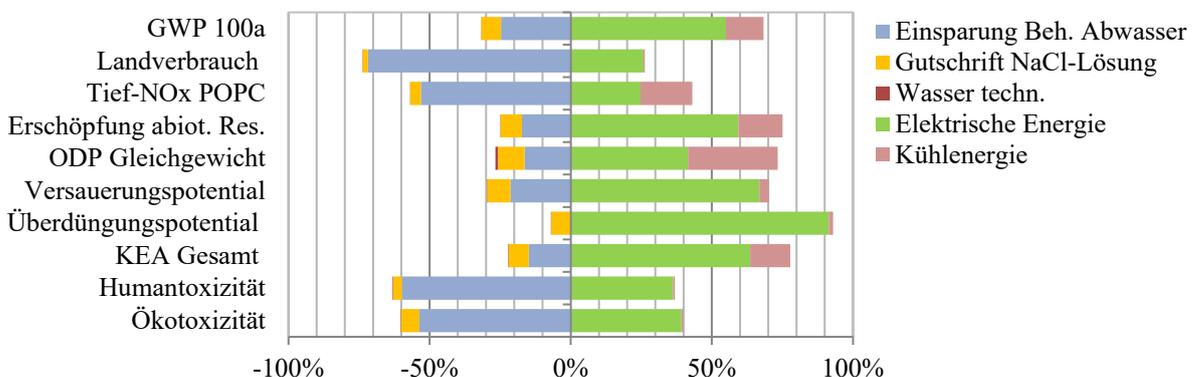


Abbildung 58: Zusammensetzung der Gutschrift „NaCl-Lösung“

Negative Werte auf der x-Achse entsprechen der Einsparung (zu favorisieren), positive Werte dem Mehraufwand (zu verringern)

Die Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung bot keinen Vorteil und ist deswegen nicht empfehlenswert.

In Tabelle 75 ist das Ergebnis der Wirkungsabschätzung der Gutschrift „Düngemittel“ dargestellt. Bei der Gutschrift „Düngemittel“ lohnte sich die Aufbereitung des techn. Wassers nicht, da größere Mengen an Strom (7.700 kJ) und Kühlenergie (6.400 kJ) aufgewendet werden müssten.

Tabelle 75: Einfluss der Gutschrift „Düngemittel“ auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung

Wirkungskategorie	Einheit	Herstellung Spinnenseide	Herstellung Spinnenseide mit Gutschrift	Prozentuale Einsparung durch Gutschrift
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	88,8	-6,96%
Landverbrauch	m ²	27,3	26,7	-2,26%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	7,2E-03	0,0	-5,50%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,7	-0,38%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	0,0	-25,01%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	1,7	+120,29%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	0,2	-81,85%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2653,9	-3,60%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	0,0	-12,02%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	83,0	-10,96%

Da Wasser in der Landwirtschaft zur Bewässerung benötigt wird, ist im möglichen Einsatzfall zu prüfen, ob eine Verwendung des Abwassers als Düngemittel, ohne Konzentrierung, in räumlicher Nähe zur Produktionsstätte (niedrige Transportaufwendungen) vorteilhafter wäre. Hierbei müsste der Einfluss einer höheren Dampfmenge für das größere Volumen zur möglicherweise notwendigen Sterilisierung berücksichtigt werden. Die Allokation der Emissionen auf dem Feld durch Ausbringung des Düngemittels ist für einen möglichen Einsatz nochmals zu prüfen. Es wurden alle enthaltenen Stoffe im Abwasser vollständig berücksichtigt.

7.1.2.2 Bewertung der möglichen Verwendung des Prozessabwassers als Düngemittel

Bedenkliche Inhaltsstoffe für die Ausbringung des Abwassers als Düngemittel auf dem Feld sind die Puffersubstanz Tris, das Antibiotikum Kanamycin und die verbleibenden ggfs. vermehrungsfähigen *E. coli* Bakterien:

- Die Puffersubstanz Tris ist laut Datenblatt des Herstellers nicht als Seewasser gefährdend eingestuft, Angaben zu weiteren Gefährdungsmöglichkeiten wurden im Datenblatt nicht gemacht. Es müsste mit den Behörden die Ausbringung des Abwassers als

Düngemittel auf dem Feld geklärt und gegebenenfalls zunächst Untersuchungen zur Freigabe durchgeführt werden.

- Das Antibiotikum Kanamycin ist sehr stabil und auch nach einer Hitzebehandlung des Abwassers könnte die Wirksamkeit des Antibiotikums bestehen bleiben. Um sicherzustellen, dass es unwirksam ist, müssten hierzu ebenfalls Untersuchungen durchgeführt werden.
- Der verwendete *E. coli*-Stamm mit der eingebrachter Spinnenseiden DNA ist als S1 (Sicherheitsstufe 1) bewertet und somit außerhalb der Laborumgebung als nicht lebensfähig eingestuft. Eine Ausbringung auf dem Feld sollte somit unbedenklich sein, es sollte jedoch vor einer Umsetzung mit der zuständigen Behörde sicherheitshalber geklärt werden, ob die Ausbringung auf ein Feld tatsächlich erlaubt wäre. Falls eine Inaktivierung der *E. coli*-Bakterien notwendig sein sollte, wäre dies durch Erhitzung des Abwassers auf über 70 °C problemlos sicherzustellen.

Die Nachbehandlung des Abwassers durch Erhitzen sowie anschließendes Abkühlen würde Aufwendungen an Energien erzeugen, die bei der Modellierung berücksichtigt werden müssten. Durch sinnvolle Prozessführung und –insatz von Wärmetauschern könnte die dafür notwendige Energie reduziert werden, jedoch sollte vor dem Verfolgen einer solchen Strategie – Verwendung des Abwassers als Düngemittel – zunächst die Auswirkung auf die Ökobilanz untersucht werden, bevor in die Untersuchungen der Inaktivierung des Kanamycins, ggfs. der *E. coli*-Bakterien, sowie der Unbedenklichkeit von Tris Ressourcen, Zeit und Geld investiert werden würden.

Bei der Berücksichtigung des Abwassers als Gutschrift zur Verwendung als Düngemittel müssten weiterhin folgende Punkte berücksichtigt werden (aus persönlicher Kommunikation mit Maximilian Schüller, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig):

- Es werden nicht alle zur Verfügung gestellten Nährstoffe von Pflanzen aufgenommen, die Aufnahmefähigkeit der Pflanzen in Abhängigkeit des Düngemittels ist die Düngewirkung und ist pflanzenabhängig
- Um ein vorhandenes ecoInvent Modul verwenden zu können muss die Düngewirkung im Vergleich zu Mineraldünger bestimmt werden und anschließend zur Gutschriftbestimmung in „Mineraldüngeräquivalente“ umgerechnet werden
- Je nach Behandlung des Abwassers ändert sich die Düngewirkung, d.h. es müssten Untersuchungen dazu durchgeführt werden

- Auf übliche Weise erzeugter Klärschlamm (durch Behandlung im Klärwerk) kann nur eingeschränkt landwirtschaftlich verwendet werden; dieser Fall von Verwendung kommunalen Abwassers ist mit erheblichen Risiken bzgl. pathogener Keime und Hormon-/Medikamentenrückständen verbunden (sofern keine 4. Reinigungsstufe zur Entfernung von Spurenstoffen vorhanden ist – in Deutschland noch kein Standard, bzw. nicht gesetzlich vorgeschrieben¹⁵¹) → Bei Verwendung von industriellem Abwasser ist zu klären, ob ein solcher Lebensweg rechtlich und/oder technisch sicher realisierbar ist
- Unabhängig von der Düngewirkung sind auch Emissionen mit der Nährstoffausbringung (N₂O!) sowie bei Auswaschung von Nitraten verbunden → diese müssen bei der Durchführung der Gutschrift berücksichtigt werden.

7.1.3 Bilanzdaten bei Variation bestimmter Prozessparameter

7.1.3.1 Zellernte mit kleinen Separatoren

Die Ernte mit fünf kleinen Separatoren wirkte sich nur auf die Menge von 25.000 kJ elektrischer Energie und 19.000 kJ Kühlenergie aus. Der Wechsel verursachte einen Mehrbedarf von 13,6% an elektrischer Energie und von 4,2% an Kühlenergie (Tabelle 76).

Tabelle 76: Energien beim Einsatz von fünf kleinen Separatoren in Vergleich zu einem großen Separator

Prozessschritt	1 großer Separator	5 kleine Separatoren	Einheit	Prozentualer Mehrbedarf
Energie, elektrisch	184.000	209.000	kJ	+13,6%
Kühlenergie	448.000	467.000	kJ	+4,2%

In Tabelle 77 sind die Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseide mit fünf Separatoren und der prozentuale Mehrbedarf in jeder Wirkungskategorie dargestellt, die größten Auswirkungen betragen bei der Erschöpfung der abiotischen Ressourcen 5%, beim Klimawandel 4,6% und beim kumulierten Energieaufwand 3,4%.

Tabelle 77: Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit fünf kleinen Separatoren im Vergleich zu einem großen Separator

Wirkungskategorie	Einheit	Gesamtbilanz Spinnenseide großer Separator	Gesamtbilanz Spinnenseide kleine Separatoren	Prozentuale Mehrbelastung
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	100,1	4,6%
Landverbrauch	m ²	27,3	27,3	0,1%
Sommersmog (Tief-NO _x)	kg Ethylen	7,2E-03	7,4E-03	3,3%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,70	5,0%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	1,6E-05	2,1%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,79	2,1%

Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	1,07	1,1%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2.851	3,4%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	2,9E-05	1,4%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	95,0	2,0%

In Abbildung 59 ist die Zusammensetzung des Mehrbedarfs in jeder Wirkungskategorie dargestellt. Den größeren Einfluss in allen Wirkungskategorien hatte der Mehrbedarf an elektrischer Energie.

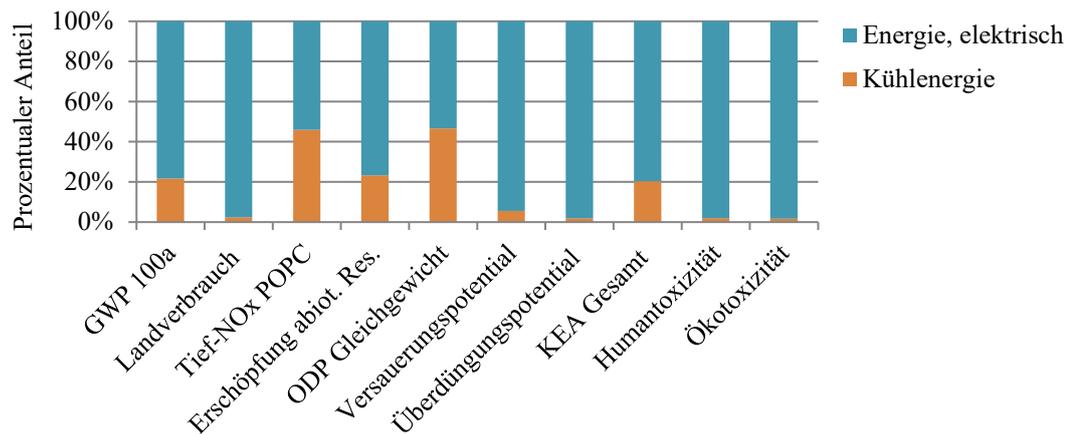


Abbildung 59: Zusammensetzung der Mehrbelastung durch den Einsatz von fünf kleinen Separatoren im Vergleich zu einem großen Separator

7.1.3.2 Filtrationsschritt mit Rohrmodul

Als Alternative zur Filtration mit einem Keramik-Modul wurde der Einsatz eines Rohrmoduls untersucht. Die Daten des Material- und Energieflusses sind in Tabelle 78 aufgeführt.

Tabelle 78: Material- und Energiefluss für 1 kg Spinnenseide mit Rohrmodul-Filtration

Materialfluss Input	Menge	Einheit
Ammoniak 25%	6,68E-3	m ³
Antibiotika	5,09E-3	kg
Diammoniumhydrogenphosphat	0,582	kg
EDTA	1,22E-6	kg
Glucose	26,5	kg
Harnstoff	34,8	kg
IPTG	0,04	kJ
Kaliumdihydrogenphosphat	1,94	kg
Magnesiumsulfat	4,84	kg
Natriumchlorid	0,447	kg
Natronhydroxid	1,11	kg
Salzsäure konz.	2,78E-3	m ³
Tris	0,463	kg
Wasser techn.	1,32	m ³
Zitronensäure	0,247	kg
Energie, elektrisch	183000	kJ
Kühlenergie	438000	kJ

Energie, thermisch	42400	kJ
Druckluft	54,8	Nm ³
Dampf	1,75	kg
Behandlung Abwasser Ernte&Filtration	0,838	m ³
Beh. Abwasser Equipment-Reinigung	0,552	m ³
Materialfluss Output	Menge	Einheit
Protein getrocknet	1,00	kg
Kohlendioxid, biogen [Luft/allgemein]	22,6	kg
Wasser [Luft/allgemein]	11,5	kg
Harnstoff	33,5	kg
Wasser techn.	0,05	m ³
Lösung 2 (8M Harnstoff)	0,0509	m ³

Statt 44,3 kg Harnstoff beim Keramikmodul würden bei Verwendung eines Rohrmoduls nur 24,4 kg für die Herstellung der 8M Harnstofflösung benötigt, die jedoch durch die Aufbereitung des harnstoffhaltigen Abwassers nicht zusätzlich benötigt, sondern aus der Rückgewinnung stammen würden.

In Tabelle 79 sind die Materialien und Energien, deren Verbrauch sich durch die Verwendung des Rohrmoduls reduzieren würde, für den gesamten Herstellungsprozess der Spinnenseide, inkl. ihrer prozentualen Einsparung, aufgelistet. Die größte Einsparung für Tris mit 44,8% ergab sich durch den geringeren Bedarf an Lösung I, für die sowohl Tris wie auch Natriumchlorid benötigt würden, gefolgt durch die Einsparung der Behandlung des Abwassers der Ernte und Filtration.

Tabelle 79: Beteiligte Rohstoffe und Energien beim Einsatz eines Rohrmoduls im Vergleich zu einem Keramik-Modul für die Filtration

Prozessschritt	Keramik-modul	Rohr-modul	Einheit	Prozentuale Einsparung
Natriumchlorid	0,447	0,810	kg	44,8%
Natronhydroxid	1,11	1,21	kg	8,3%
Salzsäure konz.	0,00278	0,00303	m ³	8,3%
Tris	0,463	0,839	kg	44,8%
Wasser techn.	1,32	1,56	m ³	15,4%
Energie, elektrisch	183000	184000	kJ	0,5%
Kühlenergie	438000	448000	kJ	2,2%
Energie, thermisch	42400	43700	kJ	3,0%
Beh. Abwasser Ernte & Filtration	0,838	1,04	m ³	19,4%
Beh. Abwasser Equipment-Reinigung	0,552	0,584	m ³	5,5%

In Tabelle 80 ist das Ergebnis der Wirkungsabschätzung durch den Einsatz des Rohrmoduls aufgeführt. Die größte prozentuale Einsparung ergäbe sich im Bereich des Überdüngungspotentials mit 18,9%, im Bereich des Klimawandels ergäbe sich eine Einsparung von 4,8%, der kumulierte Energieaufwand würde sich um 2,9 % reduzieren.

Tabelle 80: Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit Rohrmodul-Filtration im Vergleich zu Keramik-Modul-Filtration

Wirkungskategorie	Einheit	Gesamtbilanz Spinnenseide Keramik-Modul	Gesamtbilanz Spinnenseide Rohrmodul	Prozentuale Einsparung
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	91,1	-4,8%
Landverbrauch	m ²	27,3	27,3	-0,1%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	7,2E-03	6,8E-03	-4,4%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,64	-4,3%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	1,4E-05	-10,1%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,70	-10,3%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	0,89	-18,9%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2.674	-2,9%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	2,8E-05	-3,0%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	91,2	-2,1%

In Tabelle 81 sind die Materialien und Energien, deren Verbrauch sich durch die Verwendung des Rohrmoduls reduzieren würde, für den Prozessschritt der Filtration unter Einbeziehung der dazugehörigen Equipment-Reinigung und Abwasserbehandlung, inkl. ihrer prozentualen Einsparung, aufgelistet. In Tabelle 82 sind die dazugehörigen Werte der Wirkungskategorien enthalten. Im Durchschnitt reduzierten sich der Bedarf an Materialien und Rohstoffen, sowie der Anteil der Emissionen um 30%, weswegen die Nutzung des Rohrmoduls gegenüber dem Keramik-Modul vorzuziehen wäre.

Tabelle 81: Vergleich des Medien- und Energieverbrauchs für den Prozessschritt Filtration inkl. CIP und Abwasserreinigung für Keramik- und Rohrmodul

Prozessschritt	Keramik-modul	Rohr-modul	Einheit	Prozentualer Einsparung
Natriumchlorid	0,81	0,447	kg	44,8%
Natronhydroxid	0,711	0,621	kg	12,7%
Salzsäure konz.	0,00178	0,00155	m ³	12,9%
Tris	0,839	0,463	kg	44,8%
Wasser techn.	0,905	0,65	m ³	28,2%
Energie, elektrisch	4660	3650	kJ	21,7%
Kühlenergie	27200	17200	kJ	36,8%
Energie, thermisch	27200	26100	kJ	4,0%
Beh. Abwasser Ernte&Filtration	0,651	0,446	m ³	31,5%
Beh. Abw. Equipment Reinigung	0,33	0,3	m ³	9,1%

Tabelle 82: Vergleich der Wirkungsabschätzung des Prozessschritts Filtration mit Keramik- und mit Rohrmodul inkl. der Filterelemente

Wirkungskategorie	Einheit	Filtrations- schritt Keramik	Filtrations- schritt Rohrmodul	% Einsparung
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	20,28	15,93	-27,30%
Landverbrauch	m ²	0,06	0,04	-33,17%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	1,4E-03	1,1E-03	-26,29%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,14	0,11	-24,78%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	6,1E-06	4,7E-06	-30,00%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,25	0,18	-39,81%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,54	0,37	-45,09%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	364	286	-27,29%
Humantoxizität Total	CTU _h	3,59E-06	2,77E-06	-29,82%
Ökotoxizität Total	CTU _e	9,42	7,51	-25,36%

In Abbildung 60 ist die Zusammensetzung der Einsparung in den verschiedenen Wirkungskategorien in Abhängigkeit der beteiligten Materialien und Energien abgebildet. Den größten Einfluss hatte, in fast allen Wirkungskategorien, die Einsparung der Behandlung des Abwassers, gefolgt von der Einsparung der Puffersubstanz Tris.

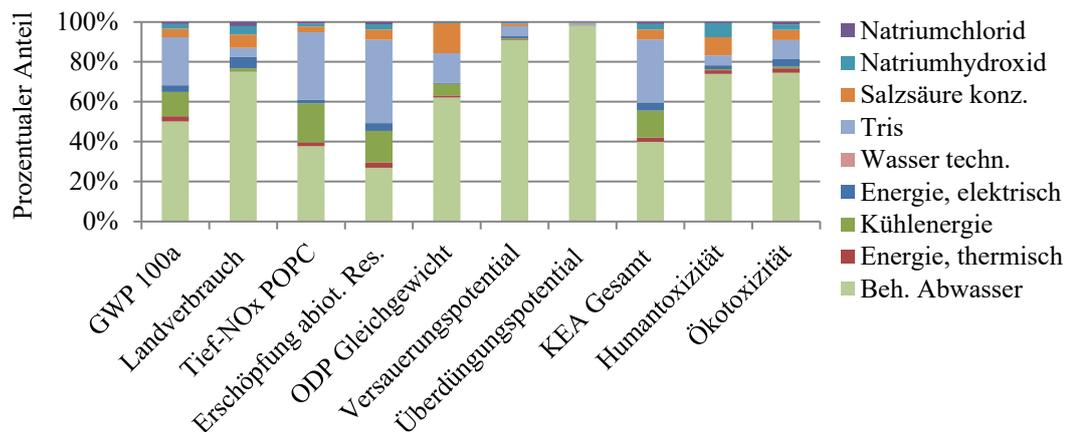


Abbildung 60: Zusammensetzung der Einsparung durch den Einsatz des Rohrmoduls beim Filtrationsschritt

7.1.3.3 Einfluss des Filtermaterials auf die Bilanzdaten der Filtration

Eine weitere durchgeführte Betrachtung war die Untersuchung des Einflusses der Berücksichtigung des Filtermediums auf die Emissionen der verschiedenen Wirkungskategorien. Beim Keramik-Modul wurde aufgrund der angenommenen Standzeit des Keramikfilterelementes, für die Herstellung von 1 kg Spinnenseide, 1,52 g des Filtermaterials Zirkonoxid verbraucht. Beim Rohrmodul wurde aus Ermangelung eines Datensatzes für Celluloseacetat mit dem Verbrauch von 0,19 g des Filtermaterials Polyvinylidenfluorid (PVDF) gerechnet. In Tabelle 83 sind die prozentualen Anteile der Filtermedien an den Emissionen des jeweiligen Filtrationsschritts, sowie das Verhältnis der durch die Verwendung der beiden Filtermaterialien er-

zeugten Emissionen zueinander, aufgelistet. Beide Filtermaterialien hatten einen sehr geringen Einfluss auf die Gesamtemissionen des Prozessschritts. Es zeigte sich, dass die Nutzung des PVDF-Filters im Vergleich zum Keramikfilter, außer in der Wirkungskategorie Sommersmog (Tief-NOx), weniger Umweltemissionen hervorrief. Dies lag größtenteils an dem geringeren Materialbedarf für das PVDF-Filterelement. Bei der Nutzung eines Celluloseacetat-Filters sollte wegen der in diesem Material nicht vorkommenden Halogene (Fluor) in der Wirkungskategorie Sommersmog auch der Filter des Rohrmoduls weniger Emissionen als der Filter des Keramik-Moduls erzeugen. Die Nutzung des Rohrmoduls wäre nicht nur bei Betrachtung des Energie- und Medienverbrauchs vorzuziehen (Kapitel 7.1.3.2), sondern auch bei Betrachtung der Filterelemente unter Verwendung eines Celluloseacetat-Filters.

Tabelle 83: Vergleich der Wirkungsabschätzung des Prozessschritts Filtration mit Keramik- und mit Rohrmodul inkl. Filterelemente

Wirkungskategorie	Einheit	Keramikfilter in % vom Prozessschritt	PVDF-Filter in % vom Prozessschritt	PVDF zu Keramik in %
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	0,03%	0,02%	67%
Landverbrauch	m ²	0,35%	0,03%	6%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	0,02%	0,05%	174%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,03%	0,02%	45%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	0,01%	0,00%	47%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,01%	0,01%	62%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,00%	0,00%	27%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	0,03%	0,01%	41%
Humantoxizität Total	CTU _h	0,04%	0,01%	12%
Ökotoxizität Total	CTU _e	0,02%	0,01%	37%

7.1.3.4 Clean-in-Place ohne Wärmerückgewinnung beim Steam-in-Place

Zur Überprüfung des Einflusses der Annahme, dass 80% der Wärmeenergie bei CIP wiederverwendet und deswegen thermische und Kühlenergie eingespart werden würde, wurde der Prozess ohne die Wärmerückgewinnung gerechnet. In Tabelle 76 sind die jeweiligen Mengen an thermischer und Kühlenergie mit und ohne Wärmerückgewinnung sowie der prozentuale Mehrbedarf angegeben.

Tabelle 84: Energien bei ausgesetzter Wärmerückgewinnung bei CIP

Prozessschritt	Mit Wärmerückgewinnung	Ohne Wärmerückgewinnung	Einheit	Prozentualer Mehrbedarf
Energie, thermisch	43.700	91.800	kJ	+110,1%
Kühlenergie	448.000	501.000	kJ	+11,8%

In Tabelle 5 sind die Auswirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien sowie der prozentuale Mehrbedarf durch die nicht durchgeführte Wärmerückgewinnung aufgelistet. In Ab-

bildung 61 sind die Anteile der thermischen Energie und der Kühlenergie an den Mehrbelastungen dargestellt. Die nicht durchgeführte Wärmerückgewinnung hatte bezogen auf die Gesamtbilanz einen mittleren Einfluss von ca. +7% in den Wirkungskategorien des Klimawandels, Sommersmog, Erschöpfung der abiot. Ressourcen, Ozonabbau und KEA.

Tabelle 85: Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit und ohne Wärmerückgewinnung beim CIP

Wirkungskategorie	Einheit	Gesamtbilanz Spinnenseide mit Wärmerückgewinnung CIP	Gesamtbilanz Spinnenseide ohne Wärmerückgewinnung CIP	Prozentuale Mehrbelastung
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	102,5	6,9%
Landverbrauch	m ²	27,3	27,3	0,0%
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	7,2E-03	7,7E-03	6,9%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,71	7,0%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	1,6E-05	5,9%
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,78	1,6%
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	1,05	1,06	0,2%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	2.872	6,6%
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	2,9E-05	2,1%
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	94,9	1,8%

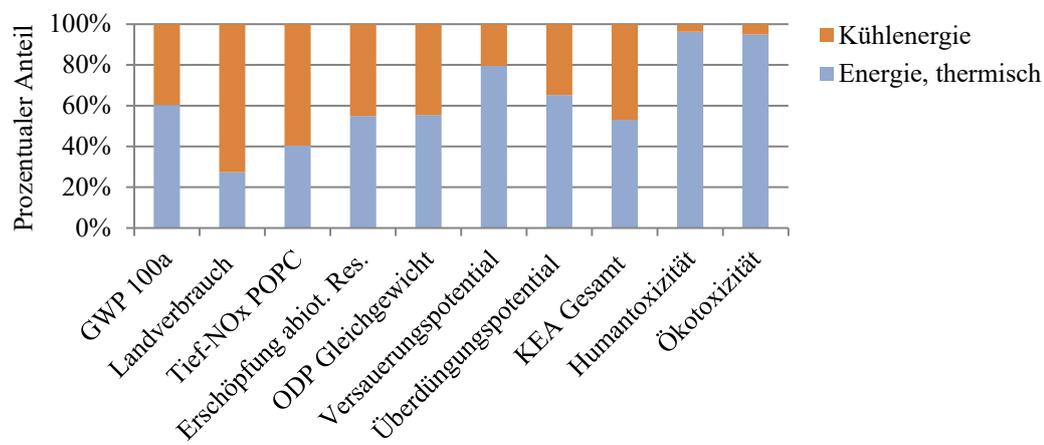


Abbildung 61: Zusammensetzung der Mehrbelastung durch Aussetzen der Wärmerückgewinnung beim CIP

7.1.3.5 Änderung des Produktionstiters

Bei der Prozessauslegung wurde darauf geachtet, dass auch bei einem höheren Produktionstiters (Konzentration des Zielproteins in der Fermentationslösung am Ende der Fermentation) die Proteinreinigung mit dem gewählten Equipment verarbeitet werden könnte. Für eine einfache Abschätzung des Einflusses konnte somit die Ausbeute variiert und der Einfluss auf die Emissionen untersucht werden. Es ergab sich dadurch ein linearer Zusammenhang zwischen Ausbeute und Emissionen (Tabelle 86). Die Steigerung der Ausbeute hatte bezogen auf die

Gesamtbilanz den größten Einfluss von allen, in Kapitel 7.1.3 betrachteten, Prozessparametern.

Tabelle 86: Vergleich der verschiedenen Ausbeuten beim Produktionsprozess von Spinnenseide pro kg Spinnenseide

Wirkungskategorie	Einheit	5 g/l pro 5 m ³ Batch	10 g/l pro 5 m ³ Batch	15 g/l pro 5 m ³ Batch
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	95,5	47,7	31,8
Landverbrauch, Inanspruchnahme	m ²	27,3	13,6	9,1
Sommersmog (Tief-NO_x)	kg Ethylen	7,2E-03	3,6E-03	2,4E-03
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,66	0,33	0,22
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,5E-05	7,7E-06	5,2E-06
Versauerungspotential Generisch	kg SO ₂ -Eq	0,77	0,39	0,26
Überdüngungspotential Generisch	kg PO ₄ -Eq	1,05	0,53	0,35
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.753	1.377	918
Humantoxizität Total	CTU _h	2,9E-05	1,4E-05	9,6E-06
Ökotoxizität Total	CTU _e	93,2	46,6	31,1

7.1.4 Zusammenfassung der Betrachtung der Herstellung künstlicher Spinnenseide

Da die Ergebnisse der Betrachtung der Herstellung künstlicher Spinnenseide sehr umfangreich sind, werden diese in den folgenden Unterkapiteln noch einmal zusammengefasst dargestellt.

7.1.4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung der Herstellung künstlicher Spinnenseide

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung der Herstellung künstlicher Spinnenseide zusammengefasst:

- Bei der Analyse der Sachbilanz zeigte sich der höchste Bedarf bei elektrischer und Kühlenergie bei der Fermentation mit 85% und der Bedarf an thermischer Energie bei der Filtration mit 49%
- Die Rückgewinnung und Wiederverwendung des Harnstoffs ist in hohem Maß angeraten, da in allen Wirkungskategorien Emissionen eingespart wurden, teilweise zu einem Vielfachen der Werte der Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseide, beim Klimawandel mit über 5-fach so hohen CO₂ Emissionen und mit 2-fach so hohen Werten beim kumulierten Energieaufwand
- Die Bereitstellung von Glucose, elektrischer Energie, Kühlenergie, konzentrierter Salzsäure, Kaliumdihydrogenphosphat, sowie die Behandlung von Abwasser waren die größten Verursacher der Emissionen in den verschiedenen Wirkungskategorien

- Bei Betrachtung der summierten Anteile der Werte aller Wirkungskategorien resultierten aus der zur Verfügungstellung von Glucose in Summe die höchsten Emissionen (Rang 1), gefolgt von der Behandlung des Abwassers (Rang 2), danach die Bereitstellung elektrischer Energie (Rang 3) und die Bereitstellung von Kühlenergie (Rang 4).
- Der Einfluss durch Ungenauigkeiten bei der Erstellung von Datensätzen durch die Verwendung bestimmte ecoInvent-Module und durch Ungenauigkeiten bei der Prozessplanung ergaben einen maximalen Fehler von 20% (basierend auf einer Hochrechnung des Produktionsprozesses als akzeptabel eingestuft, Einfluss eher gering)
- Als Ergebnis der Sensitivitätsanalyse empfiehlt sich als erster Ansatz zur Reduzierung der Umweltauswirkung der Herstellung der Spinnenseide eine Optimierung der Fermentation.

7.1.4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Gutschrift zur Entsorgung des Abwassers als Düngemittel

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Gutschrift zur Entsorgung des Abwassers stichpunktartig zusammengefasst:

- Nur die Verwendung des im Prozess entstehenden Abwassers als Düngemittel führte zu einer Umweltentlastung in mehreren Wirkungskategorien, die Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung bot keinen Vorteil und ist nicht empfehlenswert
- Der größte Anteil an der Gesamteinsparung ergab sich aus der Einsparung der Abwasserbehandlung und die Gutschrift der nicht notwendigen Rohstoffe
- Durch die Gutschrift des im Prozess entstehenden Abwassers als Düngemittel ergab sich in allen Wirkungskategorien eine Verringerung der Emissionen, außer beim Überdüngungspotential:
 - Die Mehrbelastung durch die Gutschrift betrug beim Überdüngungspotential fast 40%, den größten Einfluss hatte die Allokation der Emissionen durch Ausbringung des Düngemittels auf dem Feld
 - Die größte Einsparung ergab sich beim Versauerungspotential mit einer Einsparung von 43% der Gesamtemission durch die Behandlung des Abwassers und der Gutschrift von 4% der Gesamtemissionen bei der Herstellung von Kaliumdihydrogenphosphat

Eine abschließende Empfehlung, ob eine Verwendung des Abwassers als Düngemittel eine geeignete Option zur Reduzierung des Umweltbelastungspotentials der Herstellung künstlicher Spinnenseide darstellt, kann aufgrund der offenen Fragen und der sowohl positiven, als

auch negativen Auswirkungen in den verschiedenen Wirkungskategorien nicht ausgesprochen werden.

7.1.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse bei Variationen der Prozessdurchführung

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Variation bei der Prozessdurchführung stichpunktartig zusammengefasst:

Verwendung von fünf kleinen Separatoren statt eines großen Separators:

- Prozentualer Mehrbedarf in jeder Wirkungskategorie – größte Auswirkungen:
 - + 5% bei Erschöpfung der abiotischen Ressourcen,
 - + 4,6% bei Klimawandel und
 - + 3,4% bei kumuliertem Energieaufwand

Verwendung eines Rohrmoduls anstatt eines Keramikmoduls für die Filtration:

- Einsparung von 45% für die Puffersubstanz Tris durch den geringeren Bedarf an Lösung I, inkl. einer Einsparung der Behandlung des Abwassers der Filtration resultierend in einer Einsparung an Emission in fast allen Wirkungskategorien – größte Auswirkungen waren dabei:
 - – 18,9% bei Überdüngungspotential,
 - – 4,8% bei Klimawandel und
 - – 2,9% bei kumuliertem Energieaufwand
- Bei Betrachtung der Filterelemente waren aufgrund eines reduzierten Bedarfs an Materialien und Rohstoffen durchschnittlich 30% geringere Emissionen für die Verwendung eines Celluloseacetat-Filters (Rohrmodul) notwendig
- Durch Einsparung bei Prozessmedien, sowie geringeren Emissionswerten für die Filterelemente, ist das Rohrmodul uneingeschränkt vorzuziehen

Aussetzen der Wärmerückgewinnung bei CIP:

- Bezogen auf die Gesamtbilanz zeigte sich ein mittlerer Einfluss von ca. +7% in den Wirkungskategorien Klimawandel, Sommersmog, Erschöpfung der abiot. Ressourcen, Ozonabbau und KEA

Variation des Produktionstiters:

- Die Steigerung der Ausbeute hatte bezogen auf die Gesamtbilanz den größten Einfluss von allen betrachteten Prozessparametern.

7.1.4.4 Empfehlung zur Verbesserung der Werte in den Wirkungskategorien

Folgende Ansatzpunkte ergeben sich aus der Analyse der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung, um durch Optimierungen eine Reduzierung der Umweltauswirkung durch die Herstellung der Spinnenseide zu erreichen:

- Reduzierung des Glucosebedarfs bei der Fermentation → Ausbeute pro eingesetzter Glucose erhöhen und/oder weitere Rohstoffe untersuchen, wie z.B. Neben- und/oder Abfallprodukt anderer Prozesse zu nutzen – dabei parallel zu den angedachten Optimierungsansätzen die Auswirkung in den Wirkungskategorien analysieren, um final eine tatsächliche Reduzierung der Gesamtemissionen zu erreichen
- Reduzierung der Kühlenergie bei der Fermentation → anderen Prozess parallel laufen lassen, der die anfallende Wärmeenergie nutzt

7.2 Ergebnisse der Betrachtung des Spinnenseidengewebes im Staubbeutel

7.2.1 Ergebnisse der Sachbilanz

In Tabelle 87 sind der In- und Output des gesamten Material- und Energieflusses der Herstellung des Spinnenseiden-Submikrogewebes aufgeführt. Beim Herstellungsprozess der Spinnenseide wurden, außer bei der Aufbereitung des Harnstoffs für die Proteinreinigung, keine Gutschriften berücksichtigt. Für die Herstellung und Weiterverarbeitung des Spinnenseiden-Submikrogewebes wurden 30 kJ elektrische Energie benötigt. Im Betrieb des Staubsaugers wurden durch die Verwendung des Spinnenseiden-Submikrogewebes 5.760 kJ an elektrischer Energie eingespart. In Summe ergab dies eine Einsparung von 5.730 kJ elektrischer Energie.

Tabelle 87: Material- und Energiefluss für einen Spinnenseide-Submikrofilter „cradle-to-grave“

Input	Menge	Einheit
Aktivkornkohle	0	kg
Ammoniak 25%	7,68E-07	m ³
Antibiotika	5,85E-07	kg
Diammoniumhydrogenphosphat	6,69E-05	kg
EDTA	1,40E-10	kg
Glucose	3,05E-03	kg
Harnstoff	1,53E-04	kg
IPTG	4,59E-06	kg
Isopropanol	2,00E-06	kg
Kaliumdihydrogenphosphat	2,23E-04	kg
Magnesiumsulfat	5,56E-04	kg
Natriumchlorid	9,31E-05	kg
Natronhydroxid	1,39E-04	kg
Salzsäure konz.	3,48E-07	m ³
Tris	9,65E-05	kg
Wasser techn.	1,34E-04	m ³
Zitronensäure	2,84E-05	kg
Energie, elektrisch	30,0	kJ
Kühlenergie	77,2	kJ
Energie, thermisch	30,2	kJ
Druckluft	6,30E-03	Nm ³
Dampf	2,01E-04	kg
Behandlung Abwasser Ernte&Filtration	1,20E-04	m ³
Beh. Abwasser Equipment-Reinigung	6,72E-05	m ³
Output	Menge	Einheit
Energie, elektrisch	5.760,0	kJ

7.2.2 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In Tabelle 88 sind die Werte für eine Hochrechnung der Einsparungen pro Haushalt und Jahr dargestellt. Die Werte für die Wirkungsabschätzung eines Staubbeutels sind sehr klein und deshalb schwer greifbar. Wenn durchschnittlich eine Stunde pro Woche Staub gesaugt und ein Staubbeutel durchschnittlich für 8 Stunden eingesetzt wird, werden im Schnitt 6,5 Filterbeutel pro Haushalt und Jahr verbraucht. In Tabelle 88 sind die Ergebnisse in den Wirkungskategorien für die Erzeugung des Spinnenseidengewebes inkl. interner Gutschriften und der beiden separaten Gutschriften dargestellt. Die internen Gutschriften umfassten beim Spinnenseidengewebe einerseits die Aufbereitung des Harnstoffs im Herstellungsprozess und andererseits den Teil der elektrischen Energie, den die Herstellung des Spinnenseidengewebes verbrauchte (30 kJ), sowie der im Betrieb des Staubbeutels eingesparten elektrischen Energie (5.760 kJ). Die dadurch umsetzbare Gutschrift der eingesparten Erzeugung an elektrischer Energie in Höhe von 5.730 kJ wurde separat berechnet und dargestellt. Für die Gutschrift an eingespartem Polypropylen-Filtermaterial wurde die Erzeugung und Entsorgung von 55 g Polypropylen-Filtermaterial berücksichtigt.

Tabelle 88: Wirkungsabschätzung des Spinnenseiden-Submikrogewebes und Gutschriften pro Haushalt

Wirkungskategorie	Einheit	Spinnenseiden- gewebe inkl. int. Gutschrift	55 g PP Erzeugung & Entsorgung	5.730 kJ Erzeugung elektr. Energie
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	0,07	3,76	5,42
Landverbrauch, Inanspruchnahme	m ²	0,02	0,01	0,03
Sommersmog (Tief-NOx)	kg Ethylen	6,3E-06	2,0E-04	2,0E-04
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	0,00	0,03	0,04
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,4E-08	1,3E-07	2,6E-07
Versauerungspotential Generisch	kg SO ₂ -Eq	0,00	0,01	0,02
Überdüngungspotential Generisch	kg PO ₄ -Eq	0,00	0,01	0,02
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2	67	117
Humantoxizität Total	CTU _h	2,13E-08	2,71E-07	6,15E-07
Ökotoxizität Total	CTU _e	0,07	1,18	2,77

In der dritten Spalte der Tabelle 89 ist die Gesamtbilanz des Spinnenseidengewebes inkl. aller Gutschriften bezogen auf einen durchschnittlichen Haushalt pro Jahr aufgeführt. Die Verwendung des Spinnenseidengewebes führt zu einer Einsparung an elektrischer Energie und verwendetem Standard-Filtermaterial und überwiegt deutlich die Aufwendung zur Herstellung und Entsorgung des zusätzlichen Submikrogewebes. Es ergibt sich pro Haushalt und Jahr ein Umweltentlastungspotential beim Klimawandel von 9 kg CO₂-Equivalenten. Der Gesamtnutzen im Vergleich zum durchschnittlichen Kohlendioxid-Ausstoß pro Kopf, von 11 t CO₂-

Equivalenten pro Jahr (2010)¹⁵², ist jedoch mit einer Reduzierung um 0,04% eher gering (gerechnet mit 2 Personen im Haushalt¹⁵³). Auch im Bezug zum Kohlendioxid-Ausstoß resultierend aus dem Stromverbrauch im Haushalt, beträgt die Reduzierung der CO₂-Emissionen durch das Submikrogewebe nur 0,6%. Als Vergleich dazu führt eine Fahrt von 100 km in einem Mittelklassewagen mit 8 l Benzinverbrauch pro 100 km zu einem Ausstoß an Kohlendioxid von 29 kg. Dies entspricht ca. der dreifachen Menge, welche mit dem Spinnenseidengewebe im Staubbeutel pro Jahr eingespart werden könnte.

Mit der Annahme, dass alle eingesetzten Staubbeutel eine Lage Spinnenseidengewebe enthalten, kann mit der Gesamtanzahl der Haushalte in Deutschland, 39,8 Mio. in 2010¹⁵³, und dem Anteil von 2/3 an Staubsaugern, die einen Staubbeutel verwenden³², der Gesamtnutzen für Deutschland berechnet werden. Für den Klimawandel ergibt sich eine Entlastung von 241 Mio. kg CO₂-Equivalenten.

Tabelle 89: Umweltentlastungspotential des Spinnenseiden-Submikrogewebes „cradle-to-grave“ pro Jahr

Wirkungskategorie	Einheit	Pro Haushalt	Ganz Deutschland
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	-9,11	-241.628.569
Landverbrauch, Inanspruchnahme	m ²	-0,02	-561.616
Sommersmog (Tief-NO_x)	kg Ethylen	-3,9E-04	-10.369
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	-0,07	-1.729.140
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	-3,8E-07	-10
Versauerungspotential Generisch	kg SO ₂ -Eq	-0,03	-893.580
Überdüngungspotential Generisch	kg PO ₄ -Eq	-0,02	-604.465
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	-181	-4.807.880.095
Humantoxizität Total	CTU _h	-8,64E-07	-23
Ökotoxizität Total	CTU _e	-3,89	-103.094.323

Die Verwendung des Spinnenseidengewebes führt eindeutig zu einer Umweltentlastung, da die Einsparung an Energie und verwendetem Standard-Filtermaterial deutlich die Aufwendung zur Herstellung und Entsorgung des zusätzlichen Spinnenseidengewebes überwiegt.

Somit kann die in der EU-Richtlinie 666/2013 geforderte Energieeinsparung von Staubsaugern bei gleichbleibender Saugleistung zu einem Teil durch den Einsatz eines Spinnenseiden-Submikrogewebes geleistet werden. Bei einer Optimierung des Filteraufbaus könnte in Zukunft eine noch bessere Luftdurchlässigkeit bei höherer Filterleistung erreicht und dadurch eine noch höhere Energieeinsparung erzielt werden. Allerdings wird auch bei verdoppelter Emissionseinsparung der prozentuale Anteil, im Vergleich zu den Gesamtemissionen pro Haushalt, unter 0,1% bleiben.

Die in der genannten EU-Richtlinie bis September 2017 geforderte Stromaufnahme von max. 900 W bei gleichzeitig höherer Reinigungsleistung und der zusätzlichen Anforderung einer

maximalen Rückführung von Staub von unter 1% an die Raumluft, kann mit dem Einsatz von Spinnenseidengewebe durchaus gewährleistet werden, da Submikrofasern durch ihre höhere Oberfläche eine bessere Staubaufnahme aufweisen. Ein weiterer Vorteil von Spinnenseiden-Submikro-Vliesmaterialien in Staubbeuteln, ist die medizinische Unbedenklichkeit von Spinnenseiden⁵. Diese könnte zusätzlich die Bedenken der Verbraucher gegenüber dem Einsatz von Submikrogeweben im Staubbeutel vermindern.

Die Weiterentwicklung eines Staubbeutels mit Spinnenseiden-Filtergewebe wird durch die erhaltenen Ergebnisse positiv unterstützt. Durch die Verwendung eines ebenfalls bioabbaubaren Polymers für die anderen Filterlagen, wie z.B. PLA oder PHA, könnte ein vollständig bioabbaubarer Staubbeutel entwickelt und das Umweltentlastungspotential des Gesamtsystems weiter verbessert werden. Der Einfluss der Herstellung des Submikrogewebes ist relativ gering (zweite Nachkommastelle). Ein größerer Reduzierungseffekt kann vor allem durch eine weitere Stromeinsparung erreicht werden. Der Filteraufbau müsste hierzu weiter optimiert werden, um eine noch bessere Luftdurchlässigkeit und dadurch eine größere Stromeinsparung zu erreichen. Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung des Spinnenseiden-Submikrogewebes im Staubbeutel wurden 2015 beim Journal *Green Materials* veröffentlicht¹⁶⁶.

7.3 Ergebnisse im Vergleich zu Polyamid 6,6

Um weitere potenzielle Anwendungen von artifizieller Spinnenseide als Ersatz anderer Materialien, bezüglich ihres Umweltentlastungspotentials, vorab beurteilen zu können, wurden die Emissionswerte zur Erzeugung eines Kilogramms artifizieller Spinnenseide mit dem Datensatz für Polyamid 6,6 verglichen und dieser Vergleich im Folgenden diskutiert.

7.3.1 „Eins-zu-Eins“ Vergleich

In Tabelle 90 sind die Emissionswerte der ausgewählten Wirkungskategorien zur Erzeugung von jeweils 1 kg Material als Absolutwerte aufgeführt, sowie die Emissionswerte der Erzeugung von Spinnenseide zu den Emissionswerten der Erzeugung von Polyamid 6,6 ins Verhältnis gesetzt (Spaltenbenennung „Faktor Spinnenseide zu PA 66“).

Wissenswertes zum Datensatz von PA 6,6: zur Erzeugung von 1 kg Polyamid 6,6 (Name des Datensatzes in ecoInvent: Nylon 66) sind die Gewinnung der Rohmaterialien aus natürlichen Quellen und dazugehörige Prozesse berücksichtigt. Polyamid 6,6 entsteht bei der Reaktion von Hexamethylen und Adipinsäure. Die Ökobilanzdaten für den Datensatz in ecoInvent sind unverändert aus den Veröffentlichungen der APME übernommen worden, das Referenzjahr der Daten ist 1995, basierend auf einer jährlichen Produktionskapazität von 28.000 t in 5 Pro-

duktionsanlagen in Deutschland und Frankreich. Das Modul beinhaltet die Energieerzeugung und Transportaufwendungen (jedoch ohne genauere Angaben).

Tabelle 90: Vergleich von Spinnenseide mit Polyamid 6,6 „cradle-to-gate“ in ausgewählten Wirkungskategorien - Absolutwerte

Wirkungskategorie	Einheit	Spinnenseide	PA 66	Faktor Spinnenseide zu PA 66
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	67,08	8,02	8
Landverbrauch	m ²	30,61	0,00	131.898
Sommersmog (Tief-NO_x)	kg Ethylen	6,1E-03	6,5E-04	9
Erschöpfung abiot. Res.	kg Antimon	0,45	0,06	8
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	1,4E-05	1,3E-09	10.198
Versauerungspotential	kg SO ₂ -Eq	0,60	0,03	21
Überdüngungspotential	kg PO ₄ -Eq	0,956	0,008	126
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	2.361	137	17
Humantoxizität Total	CTU _h	2,59E-05	2,48E-07	105
Ökotoxizität Total	CTU _e	79,12	1,42	56

Die Erzeugung von 1 kg Spinnenseide weist im Vergleich zu Polyamid 6,6 in allen Wirkungskategorien höhere Beiträge auf, der Faktor „Spinnenseide zu PA 66“ reicht von Faktor 8 bis 21 für die Wirkungskategorien Klimawandel GWP 100a, Sommersmog (Tief-NO_x), Erschöpfung abiotischer Ressourcen, Versauerungspotential und Energiebedarf KEA, Faktor 56 für Ökotoxizität, Faktor 126 für Überdüngungspotential bis Faktor 131.898 für Landverbrauch (Tabelle 90).

Folgendes Fazit und weiteren Schritte können aus diesem Vergleich abgeleitet werden:

- Der Spinnenseidenprozess ist nicht vollständig optimiert – zugrundeliegend für die Erstellung der ökobilanziellen Betrachtung war eine Hochrechnung der Arbeitsschritte und Medienverbräuche des Laborprozesses auf den Produktionsmaßstab.
- Für Polyamid 6,6 wurde ein generischer Datensatz der ecoInvent Datenbank verwendet, welche Allokationen und weiteren Annahmen bei diesen Datensätzen im Detail getroffen wurden, ist nicht bekannt und kann dadurch nicht diskutiert werden.
- Für die Erzeugung von 1 kg künstlicher Spinnenseide wurden laut Sachbilanz 448 kJ Kühlenergie, 43,7 MJ thermische Energie, sowie 184 MJ elektrischer Energie benötigt. Durch die Hochrechnung des Laborprozesses kann es durch die getroffenen Annahmen bei der Auswahl des Verfahrensequipments zu einer „Schlechterrechnung“ der Herstellung künstlicher Spinnenseide gekommen sein, da bei der Abschätzung der notwendigen Energien für das Betreiben des Produktionsequipments der notwendige Energiebedarf systematisch überschätzt wurde.

- Es werden für die Herstellung von 1 kg Spinnenseide für den Transport von 47,5 kg Rohstoffen zum Produktionsort 4,75 tkm Lkw, 19,2 tkm Schiene und 265,0 tkm Frachter Übersee benötigt. Im Verhältnis zum Gesamtprozess erscheinen die Emissionen durch den Transport der Rohstoffe angemessen. Betrachtet man jedoch die Gesamtmenge der eingesetzten Rohstoffe von 47,5 kg im Verhältnis zu 1 kg Spinnenseide, erscheint die Ausbeute auch aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zu gering und sollte auf jeden Fall optimiert werden.

Es sollten, wenn möglich, reale Betriebsdaten einer Fermentation im Produktionsmaßstab für die ökobilanzielle Betrachtung herangezogen und mit den berechneten Werten verglichen werden. Des Weiteren sollte es durch eine Optimierung des Spinnenseidenherstellungsprozesses und einer ähnlichen Art der Allokationen und der weiteren Annahmen möglich sein, die Emissionswerte der Herstellung artifizieller Spinnenseide erheblich zu reduzieren. Ob durch diese Maßnahmen Emissionswerte in gleicher Größenordnung wie bei Polyamid 6,6 erreicht werden können, ist jedoch nicht sicher. Für die Erstellung eines solchen Vergleichs sollte jedoch begleitend ein unabhängiges Ökobilanzinstitut für die Erstellung der Ökobilanz beauftragt werden, damit zur Sicherstellung der Belastbarkeit der erzeugten Ergebnisse ein *Critical Review* durchgeführt werden kann.

7.3.2 Vergleich bezogen auf die Materialdaten

Betrachtet man die Materialdaten aus Tabelle 1 (anbei nochmals dargestellt), so ist zu sehen, dass ein Spinnenseidenfaden bezogen auf die Zähigkeit die höchsten Werte liefert.

Tabelle 1: Mechanische Eigenschaften von Spinnenseide in Vergleich zu verschiedenen Materialien, übernommen von ^{7,11,12,13,14}

Material	Dichte ρ [g/cm ³]	Zug- festigkeit σ [MPa]	E- Modul E [GPa]	Deh- nung ε [%]	Zähig- keit U_T [MJm ⁻³]
Spinnenseiden-Faden <i>A. diadematus</i> dragline	1,3	700	6	30	150
Polyamid 6,6	1,1	950	5	18	80
Kevlar49™	1,4	3.600	130	2,7	50
Carbonfaser	1,8	4.000	300	1,3	25
Hochzugfester Stahl	7,8	1.500	200	0,8	6

Bezieht man den Materialwert der Zähigkeit in den Vergleich der Ökobilanzdaten mit ein, so ergibt sich für Polyamid 6,6 ein Faktor von 1,87 (Zähigkeit Spinnenseide zu Zähigkeit Vergleichsmaterial; unter der Annahme, dass die Zähigkeit von künstlicher Spinnenseide gleich

der eines natürlichen Spinnenseidenfadens ist). Wie in Tabelle 90 aufgeführt, sind die Emissionswerte von Spinnenseide in den Wirkungskategorien mindestens 8-mal größer als die von Polyamid 6,6, d.h. dass Spinnenseide auch bei Berücksichtigung der Zähigkeit keine geringeren Emissionswerte liefern wird. Polyamid schneidet demnach auch bei diesem Vergleich durchwegs besser ab als Spinnenseide. Bei dieser Überlegung ist zu berücksichtigen, dass die resultierenden Emissionswerte nur die Erzeugung von 1 kg Material berücksichtigen und nicht die Weiterverarbeitung zu Fasern.

7.3.3 Fazit zum Vergleich der Herstellung von Spinnenseide mit Polyamid 6,6

Im direkten Vergleich von artifizieller Spinnenseide und Polyamid 6,6 weist Spinnenseide mit der momentanen Datenbasis kein Umweltentlastungspotential auf.

Beim Vergleich der Umweltauswirkung (Fokus CO₂-Emissionen) der Herstellung von Polymeren wurde jedoch schon nachgewiesen, dass die Herstellung von Polymeren durch Mikroorganismen, wie z.B. PLA, in der gleicher Höhe liegt oder sogar geringer ist, als die Herstellung von Polymeren durch traditionelle Herstellungsverfahren aus Rohöl^{165 S455}. D.h. es ist prinzipiell möglich Makromoleküle durch Mikroorganismen zu erzeugen, deren ökologischer Fußabdruck geringer ist, als jene, produziert durch traditionellen Herstellungsverfahren. Um bei der Optimierung des Spinnenseidenherstellungsprozesses schnell eine Verbesserung der Ökobilanz zu erzielen, empfiehlt es sich den Herstellungsprozess von biobasierten Kunststoffen zu untersuchen und daraus Ansatzpunkte für die Optimierung des Spinnenseidenherstellungsprozesses zu identifizieren.

Im Folgenden werden Empfehlungen gegeben, welche Möglichkeiten schon zum jetzigen Zeitpunkt mit der vorliegenden Datenbasis bestehen, um eine Anwendung für künstliche Spinnenseide mit Umweltentlastungspotential identifizieren zu können. Dabei wurde sich an der Anwendung der Spinnenseide im Staubbeutel orientiert.

Mögliche Anwendung für künstliche Spinnenseide mit Umweltentlastungspotential:

- Durch den Ersatz der Spinnenseide erfolgt eine erhebliche Materialeinsparung und/oder
- Die für die betrachtete Anwendung entscheidenden Materialeigenschaften der Spinnenseide übertreffen erheblich die des Materials, das ersetzt werden soll und/oder
- Das Material, das ersetzt werden soll, wird ebenso wie das Spinnenseidenprotein durch eine Vielzahl an Verarbeitungsschritten hergestellt und benötigt dafür eine große Menge an Rohstoffen (desto höher sind die voraussichtlich anfallenden Emissionen bei der Herstellung).

8 DISKUSSION

8.1 Einfluss verwendeter Methoden zur Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung wurde mit verschiedenen Methoden der Bewertung der Wirkungskategorien durchgeführt, um zu untersuchen, ob aus den verschiedenen Methoden andere Ergebnisse resultieren und dadurch abweichende Rückschlüsse abgeleitet werden könnten. Für die Wirkungskategorie Klimawandel (100a) und Ozonabbau (Gleichgewicht) wurde einerseits die „ältere“, aber weit verbreitete Methode CML2001 ausgewertet, sowie für den Klimawandel mit der Methode IPCC2007 und für den Ozonabbau mit der Methode EDIP2003. Die Methode IPCC2007 und EDIP2003 waren bis 2013, die am aussagekräftigsten angesehenen Methoden⁵⁶. Beim Vergleich der verschiedenen Bewertungsmethoden für die hier durchgeführte ökobilanzielle Betrachtung zeigte sich, dass für Klimawandel und Ozonabbau, bis zu einer Genauigkeit von mindestens der ersten Nachkommastelle, die gleichen Ergebnisse erhalten wurden. Demnach reichte für die hier untersuchte ökobilanzielle Betrachtung die Betrachtung und Darstellung der Werte jeweils einer Methode aus.

Die Analyse der Wirkungskategorien „mit“ und „ohne“ Berücksichtigung der Langzeitfolgen von Emissionen zeigte nur beim Überdüngungspotential und den Toxizitätswerten der USEtox-Methode andere Werte, diese bewegten sich jedoch in der gleichen Größenordnung. Da die hier erstellte ökobilanzielle Betrachtung auf Berechnungen und Abschätzungen basierte, reichte bei der dabei zu erreichenden Genauigkeit die Betrachtung der Werte einer Kategorie aus. Es wurde die Darstellung der Werte „ohne“ Berücksichtigung der Langzeitfolgen gewählt.

Die weiteren Wirkungskategorien wurden untersucht, um nicht nur den Einfluss von Klimawandel und Ozonabbau bei der Analyse der Ökobilanz der Herstellung von rekombinanter Spinnenseide im Blick zu haben, sondern dabei ebenso den Einfluss in anderen Wirkungskategorien abschätzen zu können, die dann ggfs. im Vergleich mit anderen Studien von Interesse sein könnten.

8.2 Einfluss verwendeter ecoInvent Datensätze

Wie in Kapitel 6.1.2.1 beschrieben, musste, aus Ermangelung an Datensätzen in der ecoInvent-Datenbank für Rohstoffe der Herstellung von Spinnenseide, die Erzeugung über chemische Synthese aus Materialien angenommen werden, für die Datensätze in der ecoInvent-Datenbank vorhanden waren. Die Auswirkung dieser Annahme auf die Bewertung der Umweltverträglichkeit der Erzeugung von Spinnenseide konnte nicht abschließend beurteilt werden. Es waren jedoch von den 14 notwendigen Rohstoffen nur 7 in der ecoInvent-Datenbank

vorhanden. Die nicht enthaltenen Rohstoffe entsprach 42% Gewichtsprozent der notwendigen Rohstoffe. Es kann durch die getroffene Annahme sowohl zu einer „Besserrechnung“, als auch „Schlechterrechnung“ des Spinnenseidenproduktionsprozesses kommen. Eine „Besserrechnung“, da bei der Annahme über chemische Synthese die reine chemische Reaktionsformel ohne Berücksichtigung des Umsetzungsgrades berücksichtigt wurde, eine „Schlechterrechnung“, da eine Erzeugung der Rohstoffe in Realität aus anderen Vorstufen mit geringeren Umweltbelastungspotential erfolgen könnte.

Die Daten der Sachbilanz wurden beeinflusst von der Qualität der ecoInvent-Module. Für Rohstoffe waren in der ecoInvent-Datenbank keine größeren Auswahlmöglichkeiten gegeben, da in den meisten Fällen nur ein Datensatz vorhanden war. Nur für Energien, Prozessmedien und Transport existierten unterschiedliche Datensätze, von diesen jedoch im Normalfall auch nur ein Datensatz vorhanden war, der sich für die Betrachtung anbot. Zur Vergleichbarkeit mit anderen Studien empfahl sich für Strom und Wärme, für die mehrere Datensätze zur Verfügung standen, jene zu verwenden, die üblicherweise für die Erstellung von Ökobilanzen verwendet werden: „Strom, Produktion UCTE“ und „Nutzwärme, Heizöl EL“. Diese Datensätze wurden im Basis-Szenario verwendet. Um den Einfluss auf die Gesamtbilanz darzustellen, wenn für Strom- und Wärmeerzeugung ein anderer Datensatz verwendet würde, wurde der Datensatz „Mini-BHKW“ für Strom und Wärme eingesetzt. In allen Wirkungskategorien, bis auf Sommersmog und Ozonbildung, reduzierten sich bei Verwendung dieses Datensatzes die Gesamtemissionen (Tabelle 91).

Tabelle 91: Anteil der Strom- und Wärmebereitstellung an den Gesamtemissionen für die Produktion künstlicher Spinnenseide

Wirkungskategorie	Einheit	Datensatz Basis-Szenario	Datensatz Mini-BHKW
Klimawandel GWP 100a	kg CO ₂ -Eq	32%	26%
Landverbrauch, Inanspruchnahme	m ²	1%	0%
Sommersmog (Tief-NO_x)	kg Ethylen	17%	38%
Erschöpfung abiot. Ressourcen	kg Antimon	33%	29%
ODP Gleichgewicht	kg CFC-11-	12%	20%
Versauerungspotential Generisch	kg SO ₂ -Eq	17%	3%
Überdüngungspotential Generisch	kg PO ₄ -Eq	9%	0%
Energiebedarf Summe KEA	MJ-Eq	23%	15%
Humantoxizität Total	CTU _h	12%	0%
Ökotoxizität Total	CTU _e	16%	0%

Für niedrigere Emissionswerte einer zukünftigen Produktion künstlicher Spinnenseide im großen Maßstab, ist bei der Wahl des Produktionsstandorts die Art der Strom- und Wärmebereitstellung nicht von Interesse, da sich kein vollständig positiver Effekt durch z.B. Nutzung eines Mini-BHKW ergab, sondern sich sogar negative Auswirkungen ergeben könnten. Generell sollte jedoch vor der Wahl eines Produktionsstandorts eine Betrachtung der lokalen Ge-

gebenheiten für die Bereitstellung von Energien und Prozessmedien vorgenommen werden, um negative Einflüsse auf die Gesamtemissionen der Herstellung von künstlicher Spinnenseide auszuschließen (siehe Kapitel 6.1.2.1: verwendeten Datensätze inkl. Beschreibung).

9 ZUSAMMENFASSUNG

Bioinspirierte Materialien, wie artifizielle Spinnenseide, können zukünftig wichtige Bestandteile von neuen Produkten sein. Artifizielle Spinnenseide verbindet die optimierten Eigenschaften von natürlichen Materialien mit modernen Methoden der Materialwissenschaften. Die These, dass die Verwendung von artifizieller Spinnenseide zur Nachhaltigkeit beiträgt, sollte jedoch fundiert überprüft werden.

Beim Vergleich von Polymer- mit Spinnenseidenfasern ist der Kostenfaktor immer das erst-rangige Argument. Polymerfasern sind sehr kostengünstig, wenn man den aktuellen Marktpreis berücksichtigt. Bei knapper werdenden Rohstoffen und steigenden Rohstoffpreisen, wie z.B. für Rohöl, und unter Berücksichtigung von Einflüssen der Umweltverträglichkeit bei der Produktion, könnte sich die biotechnologische Produktion von artifizieller Spinnenseide jedoch, in Summe aller Faktoren, als vorteilhaft herausstellen. Biotechnologische Prozesse laufen unter sanften Bedingungen (moderate Temperaturen, normaler Druck, geringe Chemikalienkonzentrationen) ab, wohingegen chemische Prozesse meist bei hohem Druck und hoher Temperatur unter Zuhilfenahme von Chemikalien, mit zum Teil negativen Umweltauswirkungen, ablaufen.

Um Nachhaltigkeit durch Quantifizierung von Umweltauswirkungen messbar zu machen bietet sich die Methodik der Ökobilanzierung bzw. das Life Cycle Assessment an. Um eine fundierte Aussage zu den potenziellen Umweltauswirkungen der Herstellung und Verwendung artifizieller Spinnenseiden treffen zu können, wurde eine vergleichende ökobilanzielle Betrachtung durchgeführt. Die erstellte vereinfachte Ökobilanz erfolgte entsprechend den Richtlinien der ISO 14040 und 14044. Eine vereinfachte Ökobilanz zeichnet sich dadurch aus, dass viele der notwendigen Daten der Sachbilanz aus Mangel realer Daten geschätzt oder berechnet werden. Es wurde einerseits die Herstellung von artifizieller Spinnenseide basierend auf einer, aus dem Labormaßstab hochgerechneten Abschätzung der Erzeugung künstlicher Spinnenseide im Produktionsmaßstab erarbeitet, sowie andererseits als eine konkrete Anwendung des Einsatzes künstlicher Spinnenseide, die Bewertung eines Spinnenseiden-Submikrogewebes im Staubbeutel im Vergleich zu einem etablierten Staubbeutel Filtergewebe, durchgeführt. Zur Erstellung der Sachbilanzdaten wurden die einzelnen Prozessschritte des Produktionsverfahrens mit Equipment abgebildet, um somit die verbrauchten Materialien, Medien und Energien im Prozess valide abzuschätzen und deren Umweltauswirkungen berücksichtigen zu können.

Zur Abbildung des Lebenszyklus und der Prozessschritte der ökobilanziellen Betrachtung wurde das Programm Umberto verwendet, welches es ermöglicht chemische und biotechno-

logische Prozesse abzubilden und zu vergleichen. Umberto ermöglicht eine einfache Modellierung, Berechnung und Visualisierung, sowie durch Verwendung einer umfangreichen, wissenschaftlich gut fundierten und transparenten Ökobilanz-Datenbank, wie ecoInvent 2.2, die Bewertung von Stoff- und Energieflüssen. Die Stoffflussdaten bieten eine wertvolle Unterstützung für den Vergleich von Technologievarianten und bei der Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen.

Die Auswertung der Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung der Produktion von 1 kg Spinnenseide zeigte als größtes Potential zur Verbesserung der Umweltauswirkung den Produktionsschritt der Fermentation. Über eine Reduzierung des Glucosebedarfs und der notwendigen Kühlenergie bei der Fermentation könnte die Herstellung von Spinnenseide optimiert und so eine erhebliche Reduzierung der Umweltauswirkung erreicht werden.

Die Bewertung der Verwendung des Spinnenseiden-Submikrogewebes in einem Staubbeutel im Vergleich zu einem etablierten Staubbeutel Filtergewebe führte eindeutig zu einer Umweltentlastung. Die Einsparung an Energie und des Standard-Filtermaterials überwog deutlich die Aufwendung zur Herstellung und Entsorgung des zusätzlichen Spinnenseiden-Submikrogewebes. Durch Einsatz eines Staubbeckels mit Spinnenseidengewebe könnten 9 kg CO₂-Äquivalente in der Wirkungskategorie Klimaerwärmung pro Jahr und Haushalt eingespart werden und mit der Annahme, dass alle eingesetzten Staubbeutel eine Lage Spinnenseidengewebe enthalten, könnte für Deutschland eine Umweltentlastung von 241 Mio. kg CO₂-Äquivalenten in der Wirkungskategorie Klimaerwärmung pro Jahr erreicht werden. Somit könnte die in der EU-Richtlinie 666/2013 geforderte Energieeinsparung von Staubsaugern bei gleichbleibender Saugleistung zu einem Teil durch den Einsatz eines Spinnenseidengewebes geleistet werden. Die Ergebnisse der ökobilanziellen Betrachtung des Spinnenseiden-Submikrogewebes im Staubbeutel wurden 2015 beim Journal *Green Materials* veröffentlicht¹⁶⁶.

Der Vergleich mit Polyamid 6,6 zu Abschätzung weiterer potenzieller Anwendungen zeigte, dass die Ergebnisse der vereinfachten Ökobilanz für Spinnenseide basierend auf der Hochrechnung des Laborprozesses bei einem 1:1 Ersatz kein Umweltentlastungspotential aufweist. Als Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Emissionswerte der Herstellung von Spinnenseide im Vergleich zu anderen Materialien wurde einerseits die Verwendung von realen Daten der Herstellung von Spinnenseide im Produktionsmaßstab identifiziert, und andererseits zur Erhöhung der Vergleichbarkeit die Anwendung gleicher Allokationsmethoden und Umsetzung weitere Annahmen bei den Herstellprozessen empfohlen.

10 SUMMARY

Bioinspired materials, such as artificial spider silk, could become an important part of new products in the future. Artificial spider silk combines the optimized features of natural materials with modern methods of materials sciences. The assertion that using artificial spider silk would contribute to sustainability, however, needs to be examined in depth.

The cost factor is always the primary argument when comparing fibers of synthetic polymers to those of spider silk. Synthetic polymer fibers are low-cost if only the actual market price is considered. With resources becoming scarcer and their costs rising, such as for crude oil, and considering the environmental sustainability of manufacturing, the biotechnological production of artificial spider silk could in sum become more advantageous. Biotechnological processes operate under mild conditions (moderate temperature, regular pressure, low chemical concentrations) whereas chemical processes operate mostly with high pressure and high temperatures with the help of chemicals with partly negative environmental effects.

Life Cycle Assessment offers the possibility to measure the sustainability of environmental impacts. A simplified ecological assessment was conducted to provide a well-founded statement about the potential economic impacts of the production and usage of artificial spider silk. The simplified LCA developed for this study was carried out according the guidelines ISO 14040 und 14044. A simplified LCA is characterized by a life cycle assessment calculated from estimated figures where data on actual operational values are unavailable. One part of the assessment was the production of artificial spider silk based on an upscaled estimation of the laboratory process. The other part of the assessment was the operation of artificial spider silk used as a sub-microfabric filter layer in a vacuum cleaner dust bag compared to the filter in a conventional dust bag. For the creation of the data for the life cycle inventory assessment, the individual production process steps were described with the equipment necessary to validly estimate the needed materials, media, and energy inputs.

The program Umberto was used to visualize the life cycle and the process steps in the simplified ecological assessment. Umberto allows the comparison of chemical and biotechnological processes. Umberto enables the assessment of material and energy flows by simple modelling, calculation, and visualization as well as by use of a comprehensive database with scientifically grounded and transparent LCA data such as ecoInvent 2.2. The material and energy flows offer a valuable support for the comparison of technology variants and the identification of improvement potentials.

The evaluation of the results of the simplified LCA for producing 1 kg spider silk showed that the process step of fermentation has the best potential for improving ecological impact. A

considerable reduction of the environmental impact from fermentation could be achieved by reducing glucose consumption and the energy required for cooling.

The evaluation of using spider silk sub-microfabric as a filter layer in a dust bag compared to a conventional dust bag filter clearly showed reduced environmental burdening. The savings in energy inputs and standard filter material considerably outweighed the costs for the additional production and disposal of the spider silk sub-microfabric. The usage of a dust bag with a spider silk filter layer could result in a reduction of 9 kg CO₂ equivalents per year and household in the impact category of climate change. Assuming that all used dust bags contained a spider silk filter layer, a reduction in environmental burdening of 241 Mio. kg CO₂ equivalents per year could be achieved in the impact category of climate change for Germany. Consequently, the required energy savings for vacuum cleaners in the EU directive 666/2013 could be provided partly by using a spider silk filter layer in vacuum cleaner dust bags. The results of the simplified ecological assessment of the spider silk sub-microfabric as a filter layer in a dust bag were published in 2015 in the journal *Green Materials*¹⁶⁶.

The comparison of the production of spider silk and polyamide 6,6 for the evaluation of future potential applications of spider silk showed that the results of the simplified LCA of the production of spider silk based on the up-scaled laboratory process did not show a 1:1 reduction in environmental burden. Two potential starting points were identified for improving the economic assessment of emission values of spider silk production compared to other materials: the use of real operation data of large-scale production as well as the implementation of comparable allocation methods and further assumptions for the compared production processes.

11 LITERATURVERZEICHNIS

- 1 <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>,
http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/brundtland_report_1987_728.htm abgerufen am 20.06.2013
- 2 http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/rio_weltgipfel_1437.htm abgerufen am 20.06.2013
- 3 DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN EN ISO14044; Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006; Beuth Verlag; 2006
- 4 Reimer V., Künkel A., Philipp S.; *Sinn oder Unsinn von Bio*; Kunststoffe 98; S. 32–36; 08.2008
- 5 Leal-Egana A. Scheibel T.; *Silk-based materials for biomedical applications*; Biotechnology and Applied Biochemistry Review 55; 155-167; 2010
- 6 <http://www.ifu.com/de/products/umberto/index.htm>; abgerufen am 15.01.2010
- 7 Goslin J.M, DeMont M.E., Denny M.W.; *The structure and properties of spider silk*; Endeavor 10; 31-43; 1986
- 8 Vollrath F.; *Spider webs and silk*, Scientific American 266; 70-75; 1992
- 9 Vollrath F.; *Strength and structure of spiders' silks*; Journal of Biotechnology 74; 67-83; 2000
- 10 Gatesy J. Hayashi C., Motriuk D., Woods J., Lewis R.; *Extreme diversity, conservation, and convergence of spider silk fibroin sequences*; Science 291; 2603-2605; 2009
- 11 Heim M. Keerl D., Scheibel T. Spider Silk; *From Soluble Protein to Extraordinary Fiber*; Angewandte Chemie International Edition 48; 3584-3596; 2009
- 12 Madsen B., Shao Z.Z., Vollrath F.; *Variability in the mechanical properties of spider silks on three levels: interspecific, intraspecific and intraindividual*; International Journal of Biological Macromolecules 24; 301–306; 1999
- 13 Heidebrecht A., Scheibel T.; *Recombinant production of spider silk proteins*; Advances in Applied Microbiology; 82; 115-153; 2013
- 14 Römer L. and Scheibel T.; *Spinnenseidenproteine: Grundlage für neue Materialien*; Chemie in unserer Zeit, 41: 306-314; 2007; doi:10.1002/ciuz.200700410
- 15 Issler L., Ruoff H., Häfele P.; *Festigkeitslehre – Grundlagen*; Springer 2003; ISBN 978-3-540-40705-8
- 16 Zlokarnik M.; *Scale-up: Modellübertragung in der Verfahrenstechnik: Modellübertragung in der Verfahrenstechnik*; Wiley-VCH 2005 (2. Auflage); ISBN-10: 9783527314225
- 17 Schmid, R. D.; *Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik*; Wiley VCH 2006 (2.Auflage); ISBN: 3527313109, 9783527313105
- 18 Seeger A., Schneppe B., McCarthy J.E.G., Deckwer W.-D., Rinas U.; *Comparison of temperature- and isopropyl-P-D-thiogalacto-pyranoside-induced synthesis of basic fibroblast growth factor in high-cell-density cultures of recombinant Escherichia coli*; Enzyme and Microbial Technology 17; 947-953; 1995
- 19 Hardy J.G., Römer L.M., Scheibel T.R.; *Polymeric materials based on silk proteins*; Polymer; Volume 49; Issue 20 - 4309-4327, 23; <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.08.006>
- 20 Spiess K, Lammel A, Scheibel T.; *Recombinant spider silk proteins for applications in biomaterials*; Macromol Biosci.;10(9):998-1007; 2010; <https://doi.org/10.1002/mabi.201090017>
- 21 Albrecht W., Erth H., Fuchs H.; *Vliesstoffe: Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung*; Wiley 2012; ISBN: 3527645896, 9783527645893;
<http://books.google.de/books?id=DG9LZL5ILMEC&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false>; abgerufen am 14.11.2018
- 22 Filatov Y, Budyka A., Kirichenko V.; *Electrospinning of Micro-and Nanofibers: Fundamentals and Applications in Separation and Filtration Processes*; Begell House 2007; 404 Seiten, ISBN: 1567002412, 9781567002416
<http://books.google.de/books?id=VoMOGQAACAAJ&dq=electrospinning+of+micro+and+nanofibers&hl=de&sa=X&ei=oHgU-aeNMKbtQbL54HABw&ved=0CFQQ6AEwAg>
- 23 Badrossamay M. R., McIlwee H. A., Goss J. A., Parker K. K.; *Nanofiber Assembly by Rotary Jet-Spinning*; Nano Letters 10(6), 2257-2261, 2010
- 24 Wendorff J.H.; Agarwal S., Greiner A.; *Electrospinning: Materials, Processing, and Applications*; Wiley 2012; ISBN: 3527647732, 9783527647736

- http://books.google.de/books?id=XbxRPMW1PQ0C&printsec=frontcover&dq=electrospinning&hl=de&sa=X&ei=EXYcU7P0N8Hoswa_2YGIAQ&ved=0CEYQ6AEwAA#v=onepage&q=electrospinning&f=false; abgerufen am 14.11.2018 10:55 Uhr
- 25 Lang G., Jokisch S., Scheibel T.; *Air Filter Devices Including Nonwoven Meshes of Electrospun Recombinant Spider Silk Proteins*; J. Vis. Exp. (75), e50492, doi:10.3791/50492; 2013
- 26 Donovan R. P.; *Fabric filtration for combustion sources*; New York: Marcel Dekker Inc.; 1985
- 27 Graham K., Ouyang M., Raether T., Grafe T., McDonald B. (Paul Knauf Donaldson Co.); *Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications*; Presented at the Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Galveston, Texas, April 9-12, 2002
- 28 <http://www.saturn-online.ch/tp/article/Staubbeutel,512519.html>, „saturn-online“ abgerufen am 07.06.2013
- 29 <http://www.der-staubsauger.eu/Technik.html>; „der-staubsauger.eu“; abgerufen am 07.06.2013
- 30 <http://www.staubsauger-test-aktuell.de/watt-staubsauger.html>, „staubsauger-test-aktuell.de“, 2011, abgerufen am 09.06.2013
- 31 http://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Draft_Ecodesign_Regulation_Vacuum_Cleaners.pdf.pdf, „eup-network.de“, 2012, abgerufen am 09.06.2013
- 32 <http://www.staubsauger-test-aktuell.de/staubsauger-mit-oder-ohne-beutel-test.html>, „staubsauger-test-aktuell.de“, 2011, abgerufen am 09.06.2013
- 33 http://www.siemens-home.de/Files/SiemensNew/De/de/Document/Siemens_Bodenpflege_2011.pdf, „siemens-home.de“, 2011, abgerufen am 07.06.2013
- 34 Bartl A.; *Fiber Recycling: Potential for Saving Energy and Resources*; ISWA World Congress 2009 – Book of Abstracts; ISBN 978-989-96421-1-9, 36-37
- 35 Stein R.S.; *Polymer recycling: Opportunities and limitations*; Proc. Natl. Acad. Sci. USA 89; 835-838, 1992
- 36 Hopewell J., Dvorak R., Kosior E.; *Plastics recycling: challenges and opportunities*; Phil. Trans. R. Soc. B 364; 2115-2126, 2009
- 37 Geiger H., Knopf H., Leistner G., Römer R., Seifert H.; *Rohstoff-Recycling und Energiegewinnung von Kunststoffabfällen*; Chem.-Ing.-Tech. 65 (6); 703-709, 1993
- 38 Zhu Z., Kikuchi Y., Kojima K., Tamura T., Kuwabara N., Nakamura T., Asakura T.; *Mechanical properties of regenerated Bombyx mori silk fibers and recombinant silk fibers produced by transgenic silkworms*; J Biomater Sci Polym Ed. 21(3):395-411; 2010
- 39 OECD Publishing; *The Application of Biotechnology to Industrial Sustainability*; ISBN 978-926-41954-62, 2001
- 40 UBA-Text 16/2001; Brellochs A., Schmolken A., Wolff H.; *Substitution chemisch-technischer Prozesse durch biotechnische Verfahren am Beispiel ausgewählter Grund- und Feinchemikalien*; Forschungsbericht 298 67 411, UBA-FB 000131, Umweltministerium des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- 41 UBA-Text 07/2005; Hoppenheidt K., Mücke W., Peche R., Tronecker D., Roth U., Würdinger E., Hottenroth S., Rommel W.; *Entlastungseffekte für die Umwelt durch Substitution konventioneller chemisch-technischer Prozesse und Produkte durch biotechnische Verfahren*, Forschungsbericht 202 66 326, UBA-FB 000778, Umweltministerium des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- 42 Heinzle E., Biwer A., Eissen M., Kholiq M.A.; *Bewertung biotechnologischer Prozesse in frühen Phasen der Entwicklung hinsichtlich Risiken bezüglich Ökologie, Sicherheit und Gesundheit*; Chemie Ingenieur Technik 78(3), 301-305, 2006
- 43 Jenck J. F., Agterberg F., Droscher M.J.; *Products and processes for a sustainable chemical industry: a review of achievements and prospects*; Green Chem. 6, 544-556, 2004

- 44 Geibler J., Hartmann D.; *Soziale Bewertung der Nachhaltigkeit von biotechnologisch hergestellten Produkten*; Forschungsbericht Kulturwissenschaftliches Institut/ Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH, 2005
- 45 Martens S., Eggers B., Evertz T.; *Untersuchung des Einsatzes von Nanomaterialien im Umweltschutz*; UBA-Text 34/2010; UBA-FB 001337, Umweltbundesamt
- 46 <http://www.gabi-software.com/deutsch/loesungen/oekobilanzen/>, abgerufen am 19.10.2018
- 47 <https://network.simapro.com/esuservices/>, abgerufen am 19.10.2018
- 48 <https://www.ifu.com/umberto/>; abgerufen am 19.10.2018
- 49 Renner I., Klöpfer W.; *Untersuchung der Anpassung von Ökobilanzen an spezifische Erfordernisse biotechnischer Prozesse und Produkte*, Forschungsbericht 201 66 306, UBA-FB 000713, Umweltministerium des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
- 50 Klöpfer W., Grahl B.; *Ökobilanz (LCA)*; Wiley Verlag Weinheim; 2009; ISBN 978-3-527-32043-1
- 51 Schonert M., Motz G., Meckel H., Detzel A., Giegrich J., Ostermayer A., Schorb A.; *Ökobilanz für Getränkeverpackungen II / Phase 2*; Forschungsbericht 103 50 504 - UBA-FB 000363; Texte 51 02 ISSN 0722-186X; September 2002
- 52 <https://www.ecoinvent.org/>; abgerufen am 29.10.2018
- 53 Hischier R., Weidema B. (Editors), Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T.; *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, Data v2.2* (2010), abgerufen 23.05.2013
- 54 Guinée J. B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P.; *(2001a) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2.*; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, retrieved from: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>
- 55 Guinée J. B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P.; *(2001b) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Part 3: Scientific Background.*; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, retrieved from: <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>
- 56 Hauschild M.Z., Goedkoop M., Guinée J., Heijungs R., Huijbregts M., Jolliet O., Margni M., De Schryver A., Humbert S., Laurent A., Sala S., Pant R.; *Identifying best practice for characterization in life cycle assessment*; International Journal of Life Cycle Assessment 18, 683-697, 2013
- 57 Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R.; *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing; Climate Change 2007: The Physical Science Basis*; Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; 2007
- 58 Daniel J.S., Velders G.J.M., Douglass A.R., Forster P.M.D., Hauglustaine D.A., Isaksen I.S.A., Kuijpers L.J.M., McCulloch A., Wallington T.J.; *Halocarbon scenarios, ozone depletion potentials, and global warming potentials, Chapter 8 in Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*; Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 50, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 2007
- 59 Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M.A.J., Jolliet, Juraske R., Koehler A., Larsen H.F. MacLeod M., Margni M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M.Z.; *USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation fac-*

- tors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment; Int J Life Cycle Assess; DOI 10.1007/s11367-008-0038-4, Februar 2008
- 60 Riesenberg D., Schulz V., Knorre W.A., Pohl H.-D., Korz D., Sanders E.A., Roß A., Deckwer W.-D.; *High cell density cultivation of Escherichia coli at controlled specific growth rate*; Journal of Biotechnology 20; 17-28; 1991
- 61 Sambrook J., Russel D.; *Molecular Cloning: A Laboratory Manual*; Cold Spring Harbour; New York; Cold Spring Harbour Laboratory Press; 2001
- 62 Huemmerich D., Helsen C.W., Oschmann J., Rudolph R., Scheibel T.; *Primary structure elements of dragline silks and their contribution to protein solubility and assembly*; Biochemistry 43; 13604-12; 2004
- 63 Fling S. P., Gregerson D. S.; *Peptide and Protein Molecular-Weight Determination by Electrophoresis Using a High-Molarity Tris Buffer System without Urea*; Analytical Biochemistry 155(1); 83-88; 1986
- 64 Laemmli U. K.; *Cleavage of Structural Proteins during Assembly of Head of Bacteriophage-T4*; Nature 227(5259); 680; 1970
- 65 Hutchinson E. G., Thornton J. M.; *A revised set of potentials for beta-turn formation in proteins*; Protein Science 3(12); 2207-16; 1994
- 66 Cantor C. R., Schimmel P. R.; *Biophysical Chemistry*; San Francisco, Freeman &Co.; 1980
- 67 Pace C. N., Schmid F.; *How to determine the molar absorption coefficient of a protein. Protein Structure: A Practical Approach*; T. E. Creighton; Oxford; IRL Press; 1997
- 68 <https://web.expasy.org/protparam/>, abgerufen am 29.10.2018
- 69 Gill S. C., Vonhippel P. H.; *Calculation of Protein Extinction Coefficients from Amino-Acid Sequence Data*; Analytical Biochemistry 182(2); 319-326; 1989
- 70 Schmid F.; *Spectral methods of characterizing protein conformation and conformational changes. Protein Structure, A practical approach*; Oxford, UK, In Creighton TE; 261-297; 1997
- 71 Lang G., Dissertation: *Herstellung und Charakterisierung von Fasern aus rekombinanten Spinnenseidenproteinen und deren potenzielle Applikationen*; Universität Bayreuth; 2015
- 72 Storhas W.; *Bioverfahrensentwicklung*; Wiley-VHC Weinheim; 2003; ISBN 3-527-28866-X
- 73 Riesenberg D., Schulz V., Knorre W.A., Pohl H.-D., Korz D., Sanders E.A., Roß A., Deckwer W.-D.; *High cell density cultivation of Escherichia coli at controlled specific growth rate*; Journal of Biotechnology 20; 17-28; 1991
- 74 Stockar U. von, Marison I.W.; *The Use of Calorimetry in Biotechnology*; Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology 40; 93-136; 1989
- 75 Schaepe S., Kuprijanov A., Aehle M, Simutis R., Lübbert A.; *Simple control of fed-batch processes for recombinant protein production with E. coli*; Biotechnology Letters 33; 1781; 1788; 2011
- 76 Cordier J.-L., Butsch B.M., Birou B., Stockar U. von; *The relationship between elemental composition and heat of combustion of microbial biomass*; Applied Microbiology and Biotechnology 25; 305-312; 1987
- 77 Kraume M. (Hrsg.); *Mischen und Rühren – Grundlagen und Verfahren*; Wiley-VCH Weinheim, 2003
- 78 Mori H., Yano T., Kobayashi T., Shimizu S.; *High density cultivation of biomass in fed-batch sytem with DO-stat*; Journal of Chemical Engineering of Japan 12:4; 313-319; 1979
- 79 Henzler H.-J.; *Auslegung von Rührfermentern- Berücksichtigung der nicht-Newtonschen Fermentationslösungen“*; Chemie Ingenieur Technik; 79:7; 951-964; 2007
- 80 Islam R.S., Tisi D., Levy M.S., Lye G.J.; *Scale-Up of Escherichia coli Growth and Recombinant Protein Expression Conditions from Microwell to Laboratory and Pilot Scale Based on Matched kLa*; Biotechnology and Bioengineering 99:5; 1128-1139; 2008
- 81 Hughmark G.A.; *Power requirements and interfacial area in gas-liquid turbine agitated systems*; Industrial & Engineering Chemistry - Process Design and Development 19; 638-641; 1980

- 82 Storhas W.; *Bioreaktoren und periphere Einrichtungen*; Vieweg Verlag Braunschweig/Wiesbaden; 1994; ISBN 3-528-06510-9
- 83 Schmid R.D.; *Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik*; Wiley-VCH Weinheim; 2. Auflage 2006; ISBN 3-527-31310-9
- 84 Hass V.C., Pörtner R.; *Praxis der Bioprozesstechnik*; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg; 2009; ISBN 978-3-8174-1795-4
- 85 Chmiel H. (Hrsg.); *Bioprozesstechnik*; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg; 2. Auflage 2006; ISBN 978-3-8174-1607-0
- 86 Sanchez-Ruiz S. A.; *Studies on cell disruption and cell debris removal in downstream processing*; Masterarbeit am Massachusetts Institute of Technology, 1989
- 87 Kepka C., Collet E., Persson J., Stahl A., Lagerstedt T., Tjerneld F., Veide A.; *Pilot-scale extraction of an intracellular recombinant cutinase from E. coli cell homogenate using a thermoseparating aqueous two-phase system*; Journal of Biotechnology 103; 165-181; 2006
- 88 Product description: <http://www.westfalia-separator.com/products/product-finder/product-finder-detail/product/separator-cse-170-06-477.html#scopeofdelivery>, abgerufen am 06.12.12
- 89 Product brochure: Pharmaceutical Biotechnology Downstream processing with centrifuges and package units from GEA Westfalia Separator
<http://www.westfalia-separator.com/fileadmin/Media/PDFs/Brochures/pharmaceutical-biotechnology-CP-12-01-0004.pdf>, S19 abgerufen am 06.12.12
- 90 Zeman L.J., Zydny A. L.; *Microfiltration and Ultrafiltration – Principles and Applications*; Marcel Dekker Inc. New York; 1996; ISBN 0-8247-9735-3
- 91 Kuchling H.; *Taschenbuch der Physik*; S. 259ff, 19. Auflage; Carl Hanser Verlag München; ISBN 978-3-446-41028-2
- 92 Willems W.M., Schild K., Dinter S., Stricker D.; *Formeln und Tabellen Bauphysik – Wärmeschutz – Feuchteschutz – Klima – Akustik – Brandschutz*; 1. Auflage Juni 2007; Vieweg; Seite 45ff
- 93 Beitz W., Grohe K.-H. (Hrsg.); *Doppel Taschenbuch für den Maschinenbau*; Kapitel D 10.2, S. D26ff); 19. Auflage, Springer Verlag ISBN 9-783-540-99634-7
- 94 Skript Energiemanagement 2004/2005; Universität Bayreuth LTTT; Kapitel 7; Pinch-Analyse
- 95 Heft der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg: *Industrie und Gewerbe X: Mit der Pinch-Technologie Prozesse und Anlagen optimieren*; http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/5783/p6-071_zz.pdf, abgerufen am 25.06.2012
- 96 Hischier R., Weidema B. (Editors), Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Frischknecht R., Hellweg S., Humbert S., Jungbluth N., Köllner T., Loerincik Y., Margni M., Nemecek T.; *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, Data v2.2* (2010), abgerufen am 23.05.2013
- 97 Guinée J. B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de, Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de, Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P.; *(2001a) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Parts 1 and 2.*; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands, <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html> abgerufen am 23.05.2013
- 98 Guinée J. B., (final editor), Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., de Koning A., van Oers L., Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H. A., de Bruijn H., van Duin R., Huijbregts M. A. J., Lindeijer E., Roorda A. A. H. and Weidema B. P.; *(2001b) Life cycle assessment; An operational guide to the ISO standards; Part 3: Scientific Background.*; Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), Den Haag and Leiden, The Netherlands; <http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html> abgerufen am 23.05.2013

- 99 Hauschild M.Z., Goedkoop M., Guinée J., Heijungs R., Huijbregts M., Jolliet O., Margni M., De Schryver A., Humbert S., Laurent A., Sala S., Pant R.; *Identifying best practice for characterization in life cycle assessment*; International Journal of Life Cycle Assessment 18; 683-697; 2013
- 100 Boustead I., Hancock G.F.; *Handbook of Industrial Energy Analysis*; John Wiley and Sons Inc., New York; 1979; <https://doi.org/10.1002/aic.690260138>
- 101 Pimentel D., Hurd L.E., Bellotti A.C., Forster M.J., Oka I.N., Sholes O.D., Whitman R.J.; *Food Production and the Energy Crisis*; Science, November 1973; 182(4111):443-9.; DOI: 10.1126/science.182.4111.443
- 102 VDI-Richtlinie: *VDI 4600 Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden*; 2012-01; https://www.vdi.de/uploads/tx_vdirili/pdf/1807038.pdf, abgerufen am 30.10.2018
- 103 https://db.ecoinvent.org/reports/03_LCIA-Implementation-v2.2.pdf; abgerufen am 14.11.2018
- 104 Liu Y., He J. H., Yu J. Y. & Zeng, H. M.; *Controlling numbers and sizes of beads in electrospun nanofibers*; Polymer International 57(4); 632-636; 2008
- 105 Huang Z. M., Zhang Y. Z., Kotaki, M. & Ramakrishna, S.; *A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites*; Composites Science and Technology 63(15); 2223-2253; 2003
- 106 Garg K. & Bowlin G. L.; *Electrospinning jets and nanofibrous structure*; Biomicrofluidics 5(1); 2011
- 107 Haghi A. K. & Akbari M.; *Trends in electrospinning of natural nanofibers*; Physica Status Solidi A - Applications and Materials Science 204(6); 1830-1834; 2007
- 108 <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1102&lng=1>; abgerufen am 08.11.2018
- 109 https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polyethylenterephthalat-pet?n=1301_1; abgerufen am 08.11.2018
- 110 https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polypropylen-pp-h?n=1502_1; abgerufen am 08.11.2018
- 111 http://www.topas-gmbh.de/dateien/prospekt/dehs_prspd.pdf; abgerufen am 03.06.2013
- 112 Lang G., Jokisch S. & Scheibel T.; *Air filter devices including nonwoven meshes of electrospun recombinant spider silk proteins*; Journal of Visualized Experiments 75(e50492); 2013
- 113 Vogel H.C., C.L. Tadaro C.L.; *Fermentation and Biochemical Engineering Handbook - Principles, Process Design, and Equipment*; William Andrew Publishing/Noyes; 1997
- 114 Baneyx F., Mujacic M.; *Recominant protein folding and misfolding in Echerichia coli*; Nature Biotechnology 22 (11); 1399-1408; 2004
- 115 Steinfeldt M. pers. Kommunikation, Universität Bremen, Fachgebiet 10 – Technikgestaltung und Technologieentwicklung; 2012
- 116 Bailey S.M., Meagher M.M.; *Crossflow Microfiltration of Recombinant Escherichia Coli Lysates after High Pressure Homogenisation*; Biotechnology and Bioengineering; 53 (3); 304-310; 1997
- 117 Bailey S.M., Meagher M.M.; *Separation of soluble protein from inclusion bodies in Escherichia coli lysate using crossflow microfiltration*; Journal of Membrane Science; 166 (1); 137-146; 2000
- 118 Lee C.T., Morreale G., Middleberg A.P.J.; *Combined In-Fermenter Extraction and Crossflow Microfiltration for Improved Inclusion Body Processing*; Biotechnology and Bioengineering; 85 (1); 103-114; 2004
- 119 Forman S.M., DeBernandez E.R., Feldberg R.S., Swartz R.W.; *Crossflow filtration of inclusion bodies from soluble protein in recombinant Escherichia coli cell lysate*; Journal of Membrane Science; 48 (2-3); 263-279; 1990
- 120 Baruah G.L., Nayak A., Belfort G.; *Scale-up from Microfiltration to a ceramic pilot plant: Design and performance*; Journal of Membrane Science 274; 56-63; 2006
- 121 Thormet A., Gallmann P.; *Neue Milchprodukte dank Membrantechnik*; FAM-Info; April 2003; Nr. 453

- 122 Thormet A.; *Herstellkosten von MF-Konzentrat – Leitfaden für die Praxis*; ALP Forum 2004; Nr.16 d
- 123 Nielsen W.K.; *Membranverfahren und verwandte molekulare Separationsverfahren*; APV Unna/Verlag Th. Mann Gelsenkirchen; 2004; ISBN 3-7862-0149-8
- 124 Ishihama Y., Schmidt T., Rappsilber J., Mann M., Hartl F.U., Kerner M.J., Frishman D.; *Protein abundance profiling of the Escherichia coli cytosol*; BMC Genomics 2008; 9:102 Supplementary Table S2. Data on all identified proteins
- 125 Pattnaik P., Louis I., Mahadevan M.S.; *Use of Membrane Technology in Bioprocessing Therapeutic Proteins from Inclusion Bodies of E. coli*; BioProcess International; March 2009; 45-62; 2009
- 126 Mukhopadhyay A.; *Inclusion bodies and purification of proteins in biologically active forms*; Bio-treatment, Downstream Processing and Modelling - Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology; Volume 56; 61-109;1997
- 127 Taylor G., Hoare M., Gray D.R., Marston F.A.O.; *Size and Density of Protein Inclusion Bodies*; Nature Biotechnology 4; 553 – 557; 1986
- 128 Technical Brief Millipore; *Protein Concentration and Diafiltration by Tangential Flow Filtration*; 2003,
[http://www.millipore.com/publications.nsf/a73664f9f981af8c852569b9005b4eee/ab3ba3a9d06cc6f185256bd10068b0de/\\$FILE/TB032.pdf](http://www.millipore.com/publications.nsf/a73664f9f981af8c852569b9005b4eee/ab3ba3a9d06cc6f185256bd10068b0de/$FILE/TB032.pdf), abgerufen am 20.11.2012
- 129 Keller C., Geberth S.; *Praxis der Nephrologie*; Springer Verlag Berlin Heidelberg Ney York; 3. Auflage 2010
- 130 <http://www.membratec.ch/template/fs/documents/EauPotable/EauPotableD.pdf>,
<http://www.membratec.ch/template/fs/documents/EauPotable/OsmoseD.pdf>, abgerufen am 17.06.2013
- 131 Falch E.A.; *Dynamic Determinations of the Thermal Characteristics of Fermentation Tanks – Communications to the Editors*; Biotechnology and Bioengineering; 10 (2); 233-237; 1968
- 132 Ivanov E. V., Korolev V. P., Antonova O. A., Abrosimov V. K.; *Enthalpies of Solution of Urea in Water–Methanol Mixtures at 298.15 K*; Russian Journal of Physical Chemistry; 80 (2); 193-195; 2006
- 133 Peper-Bienzeisler R.; Fickenfrerichs H., Jansen W.; *Neutralisationsenthalpien – Warum sind sie so verschieden?*; CHEMKON 2012; 19; Nr. 1, 21-28; 2012
- 134 DTS® SteriFix E 1000/3000, DTS Wasser-Abwasser-Technik GmbH,
https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&ved=0CEcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.envirodts.de%2Fres%2Fphp%2Fsendfile.php%3Ffile%3Dabwasseraufbereitung%2Fsterifix_1000_3000.pdf&ei=K3sPUvSTNYjWswbG14HACA&usq=AFQjCNErv-m-A4ogWXLp_yVCidmzHDGlcQ&bvm=bv.50768961,d.Yms, abgerufen am 27.06.2012
- 135 Harrison R.G., Todd P., Rudge S.R., Petrides, D.P.; *Bioseparations science and engineering, Kap. Bioprocess Design*; Oxford Press 2002; Cambridge UK; ISBN 0195123409
- 136 Radledge C., Kristiansen, B.; *Basic Biotechnology, Kap. Process economics*; Cambridge University Press 2001; Cambridge UK; ISBN 9780521779173
- 137 Einsatz von Biomaterialien in Filtersystemen, Schlussbericht im Rahmen der Fördermaßnahme BIOFIS Förderkennzeichen: 01RB0710 A-D, Vorhabenbezeichnung: Einsatz von Biomaterialien in Filtersystemen, Bericht vom 31.07.2012
- 138 Böck A., pers. Kommunikation, BSH AG, 2012
- 139 Bothe A., Nowaczyk U., Schmidt E.; *Untersuchung zum Wärme- und Stoffaustausch von neuen Arbeitsstoffpaaren in Absorptionswärmepumpen*; Bericht EUR 12836 DE, Kommission der Europäischen Gemeinschaften – energie, Generaldirektion Wissenschaft, Forschung und Entwicklung Forschungsvertrag EN-3E-0024/D, Katalognummer: CD-NA-12836-DE C, EGKS - EWG - EAG, Brüssel - Luxemburg, 1990

- 140 Baehr H.D., Stephan K.; *Wärme- und Stoffübertragung (Tabelle B.1: Wärmekapazität und Dichte von Luft)*; 6. Auflage Springer Verlag Berlin Heidelberg; 2008; ISBN 978-3-540-87688-5
- 141 VDI Wärmetlas; *Dca 10: Dichte Isopropanol, Dca 21: Wärmekapazität Isopropanol*; 10. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2006; ISBN 3-540-25503-6
- 142 <http://www.kaweha-anlagentechnik.de/mobile-absaugsysteme-airmaster-loesemitteldampfe.php>; abgerufen am 03.06.2013
- 143 Bongartz W.; pers. Kommunikation; Firma Carbo-Tech AC am 10. und 12.06.2013, in Anhang M, das Partialdruckverhältnis p/ps entspricht dem Isopropanol-Volumenstrom in g/m³/100, http://www.carbotech.de/film/carboTech_12_cut_medium.wmv
- 144 Bathen D., Breitbach M.; *Adsorptionstechnik*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2001; ISBN 3-540-41908-X; S.23
- 145 VDI Wärmetlas; *Dca 21: Wärmekapazität Isopropanol flüssig, Dca 17: Verdampfungsenthalpie Isopropanol mit Formel Dca 1 (9) bei 82 °C, Dca 25: Wärmekapazität Isopropanol gasförmig*; 10. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2006; ISBN 3-540-25503-6
- 146 VDI Wärmetlas; *Dca 2: Dichte Stickstoff, Dca 23: Wärmekapazität Stickstoff*, 10. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York; 2006; ISBN 3-540-25503-6
- 147 <http://staubsauger-test.info/haufige-fragen/wie-oft-sollte-man-den-staubsaugerbeutel-wechseln/>; „Staubsauger-test.info“, 2013; abgerufen am 07.06.2013
- 148 <http://www.sterlitech.com/membrane-disc-filters.html>; abgerufen am 17.06.2013
- 149 DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DIN 28136-1:2005-12; Rührbehälter - Teil 1: Hauptmaße
- 150 ASME BPE-2007; American Society of Mechanical Engineers for Bioprocessing Equipment
- 151 <https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/abwasser/spurenstoffe.htm>, abgerufen am 17.11.2019
- 152 http://wwf.klimaktiv-co2-rechner.de/de_DE/popup/?cat=person; abgerufen am 23.08.2013
- 153 <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/350573/umfrage/haushaltsgroesse-in-den-eu-laendern/>; abgerufen 14.11.2018
- 154 Lee S.Y.; „*High cell-density culture of Escherichia coli*“; Trends in Biotechnologies 14(3); 98-105; 1996
- 155 <https://www.oxy.com/ourbusinesses/chemicals/products/documents/causticsoda/caustic.pdf>; OxyChem NaOH Handbook; abgerufen am 13.11.2018
- 156 <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=bd647fe6a2fd45a1a5df8b79d8d6b74d&ckck=1>; abgerufen am 14.11.2018
- 157 http://www.oxychile.cl/rps_oxychile_v56/OpenSite/Oxy%20Espa%C3%B1ol/Productos%20y%20Servicios/Acido%20Clorh%C3%ADrico/20080124151014/HandbookHydrochloricAcid_OFICI_AL.pdf, abgerufen am 14.11.2018
- 158 https://www.ecoinvent.org/files/200712_frischknecht_jungbluth_overview_methodology_ecoinvent2.pdf; abgerufen am 14.11.2018
- 159 Van Wegen R.J., Ling Y., Middleberg A.P.J.; *Industrial Production of Polyhydroxyalkanoates using Escherichia Coli: An Economic Analysis*; Trans IChemE 76A; 417-426; 1998
- 160 <http://www.bio-based.eu/ecology/>; „Meta-Analyse von Ökobilanzen für biobasierte Polymere“; abgerufen am 06.05.2013
- 161 Kasirajan S., Ngouajio M.; *Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review*; Agron. Sustain. Dev. 32; 501-529; 2012
- 162 Lenz R.W., Marchessault R.H.; *Bacterial Polyesters: Biosynthesis, Biodegradable Plastics and Biotechnology*; Biomacromolecules 6 (1); 1-8; 2005
- 163 Umweltbundesamt: *Hintergrundpapier "Handreichung Bewertung in Ökobilanzen"*; August 2000; https://www.probas.umweltbundesamt.de/download/uba_bewertungsmethode.pdf; abgerufen am 18.10.2019

-
- 164 Wardenaar T., van Ruijven T., Mendoza Beltran A., Vad K., Guinée J. and Heijungs R.; *Differences between LCA for analysis and LCA for policy: a case study on the consequences of allocation choices in bio-energy policies*; Int J Life Cycle Assess 17; 1059-1067; 2012;
<https://doi.org/10.1007/s11367-012-0431-x>
- 165 Biron M.; *Industrial Applications of Renewable Plastics: Environmental, Technological and Economical Advances*; Elsevier Ltd 2017; ISBN: 9780323480659; <https://doi.org/10.1016/C2015-0-06835-6>
- 166 Lauterbach A.Y., Scheibel T.; Life cycle assessment of spider silk nonwoven meshes in an air filtration device; Green Materials, Vol. 3 Issue 1, 15-24, 2015,
<https://doi.org/10.1680/gmat.14.00011>

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Von der Spinne zur artifiziellen Spinnenseide	5
Abbildung 2:	Grundfließbild der Herstellung von rekombinanter Spinnenseide	6
Abbildung 3:	Herstellung unterschiedlicher Morphologien aus artifizieller Spinnenseide ^{15,20}	7
Abbildung 4:	Darstellung des Prinzips des Elektrospinnings	8
Abbildung 5:	Geschwindigkeitsprofile an der Faseroberfläche ^{nach 27}	10
Abbildung 6:	Schematische Darstellung der Filterwirkung beeinflusst durch Schlupfströmung	11
Abbildung 7:	Aufnahme von Submikrofasern mit daran haftenden Partikeln und Trägermaterial (Mikrofaser) im Hintergrund	11
Abbildung 8:	Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14044	12
Abbildung 9:	Einfaches Stoffstromnetz in Umberto	14
Abbildung 10:	Kamera-Aufnahmen vom Elektrospinning mit 7,5%iger eADF4(C16)-Lösung in HFIP auf verschiedenen Materialien	37
Abbildung 11:	REM-Aufnahmen elektrogesponnener Submikrofasern, 7,5%iger eADF4(C16)-Lösung in HFIP	37
Abbildung 12:	Einfluss des Trägermaterials PA vs. PET auf die Faserbildung	38
Abbildung 13:	Einfluss des Trägermaterials PET vs. PP auf die Faserbildung	38
Abbildung 14:	REM-Aufnahmen elektrogesponnener Submikrofasern auf PA-Gewebe mit verschiedenen Konzentrationen der Spinnlösung	40
Abbildung 15:	REM-Aufnahmen von Submikrofasern aus 3,5%iger PCL-Lösung in HFIP auf PA-Gewebe	41
Abbildung 16:	REM-Aufnahmen des Vergleichs der Anzahl an Lagen von PA-Gewebe	41
Abbildung 17:	REM-Aufnahmen des Einflusses der Polung der Hochspannungsquelle bei PET	42
Abbildung 18:	REM-Aufnahmen des Einflusses der Hochspannungsdifferenz auf die Fasermorphologie bei PET	42
Abbildung 19:	Volumenvlies PP, Hochspannung +30 kV / -20 kV	43
Abbildung 20:	Verschiedene Vliese im Vergleich, Hochspannung +30 kV / -20 kV	44
Abbildung 21:	Herstellen eines Spinnenseiden-Submikrogewebes durch Elektrospinning	46
Abbildung 22:	Nachbehandlung des Spinnenseiden-Submikrogewebes in einer Nachbehandlungskammer	47
Abbildung 23:	Messung der Luftdurchlässigkeit von nachbehandeltem Spinnenseiden-Submikrogewebe auf Trägermaterial	47
Abbildung 24:	Darstellung des Staubbeutel mit Spinnenseiden-Submikrogewebe ¹³⁷	48
Abbildung 25:	REM-Aufnahme eines elektrogesponnenen Spinnenseiden-Submikrogewebes auf dem Trägermaterial Polyamid (im Hintergrund) nach der Messung mit dem Norm-Aerosol DEHS	49
Abbildung 26:	Wachstumskurve und Volumenzunahme der Hauptfermentation	54
Abbildung 27:	Wachstumskurve und Sauerstoffaufnahme der Hauptfermentation	55
Abbildung 28:	Wachstumskurve, Stromverbrauch und eingebrachte Wärmemenge der Hauptfermentation	59
Abbildung 29:	Zusammenfassung der Filtrationsschritte bei der Proteinreinigung	64
Abbildung 30:	Übersicht über Verwendung von Glucose und entstehendes Abwasser bei Ernte und Filtration	73
Abbildung 31:	Prozessfließbild der Prozessauslegung	86
Abbildung 32:	Staubbeutel mit Spinnenseiden-Submikrogewebe ¹³⁷	87
Abbildung 33:	Systemfließbild der Herstellung eines Filterbeutels „cradle-to-grave“	88
Abbildung 34:	Systemfließbild der für die Betrachtung des Seidenfiltergewebes notwendigen Module „cradle-to-grave“	89
Abbildung 35:	Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses der Spinnenseide	96
Abbildung 36:	Stoffstromnetz der Herstellung der Spinnenseide	97
Abbildung 37:	Subnetz der Herstellung der Spinnenseide	97
Abbildung 38:	Subnetz der Medienbereitstellung für die Fermentation	98
Abbildung 39:	Subnetz der Herstellung der Reinigungslösung für CIP	98
Abbildung 40:	Subnetz der Herstellung der Lösungen für die Proteinreinigung	98
Abbildung 41:	Subnetz der Abwasserbehandlung	98

Abbildung 42:	Subnetz der Herstellung des Spinnenseiden-Seidengewebes	113
Abbildung 43:	Stoffstromnetz der Herstellung eines bio-inspirierten Spinnenseiden-Gewebes.....	114
Abbildung 44:	In Umberto modelliertes Stoffstromnetz zur Einsparung an Filtermaterial.....	116
Abbildung 45:	Anteil der Energien bei der Herstellung von 1 kg Spinnenseide „cradle-to-gate“	121
Abbildung 46:	Verteilung der Energien nach Prozessschritt	121
Abbildung 47:	Einfluss der einzelnen Medien und Energien bei der Aufbereitung des Harnstoffs..	124
Abbildung 48:	Summierte prozentuale Anteile der Rohstoffe in allen Wirkungskategorien	128
Abbildung 49:	Summierte prozentuale Anteile der Rohstoffe in ausgewählten Wirkungskategorien	128
Abbildung 50:	Gliederung der Anteile des Rohstoff- und Energieeinsatzes in den Wirkungskategorien nach Einsatz im Prozess.....	130
Abbildung 51:	Fehlerbetrachtung für Materialien über chemische Synthese aus ecoInvent-Modulen ...	131
Abbildung 52:	Prozentuale Anteile an den Gesamtemissionen einer Wirkungskategorie durch den Materialbedarf für Fermentation, Filtration und SIP/CIP.....	133
Abbildung 53:	Summe des Einflusses des abgeschätzten Fehlers bei der Prozessauslegung auf die Wirkungsabschätzung bei der Betrachtung der eingesetzten Rohstoffe für Fermentation, Filtration und CIP/SIP	134
Abbildung 54:	Prozentuale Anteile an den Gesamtemissionen einer Wirkungskategorie durch Bereitstellung der verschiedenen Energien	135
Abbildung 55:	Summe des Einflusses des abgeschätzten Fehlers bei der Prozessauslegung auf die Wirkungsabschätzung bei der Betrachtung der Bereitstellung der verschiedenen Energien.....	135
Abbildung 56:	Zusammenfassung des Einflusses der Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung auf die Wirkungsabschätzung.....	136
Abbildung 57:	Zusammensetzung der Gutschrift bei Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittel.....	140
Abbildung 58:	Zusammensetzung der Gutschrift „NaCl-Lösung“.....	141
Abbildung 59:	Zusammensetzung der Mehrbelastung durch den Einsatz von fünf kleinen Separatoren im Vergleich zu einem großen Separator	145
Abbildung 60:	Zusammensetzung der Einsparung durch den Einsatz des Rohrmoduls beim Filtrationsschritt.....	148
Abbildung 61:	Zusammensetzung der Mehrbelastung durch Aussetzen der Wärmerückgewinnung beim CIP	150

13 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Mechanische Eigenschaften von Spinnenseide im Vergleich zu anderen Materialien, übernommen von ^{7,11,12,13, 15}	4
Tabelle 2:	Relevante Studien und Veröffentlichungen.....	18
Tabelle 3:	Parameter zum Erzeugen von Submikrogeweben auf verschiedenen Trägermaterialien	45
Tabelle 4:	Elektrische Eigenschaften der betrachteten Trägermaterialien als Blockmaterial.....	45
Tabelle 5:	Gegenüberstellung der Gesamtwerte der Filtration	65
Tabelle 6:	Berechnete Gesamtmengen für die Fermentation.....	67
Tabelle 7:	Behältergrößen für die Medienbereitstellung	67
Tabelle 8:	Lösungen und technisches Wasser für Filtrationsschritte (5 m ³ Batch)	68
Tabelle 9:	Stoffmengen bei der Proteinreinigung (5 m ³ Batch).....	68
Tabelle 10:	Behälterabmessungen	69
Tabelle 11:	SIP-Verbrauch der Fermenter (bei Leersterilisation)	69
Tabelle 12:	CIP-Verbrauch und entstehendes Abwasser (5 m ³ Batch)	70
Tabelle 13:	Verbrauch an Kühlenergie für SIP und CIP (5 m ³ Batch)	71
Tabelle 14:	Stoffmengen und Kühlenergie zur Equipment-Reinigung (5 m ³ Batch)	71
Tabelle 15:	Abwassermengen bei den jeweiligen Prozessschritten (5 m ³ Batch)	72
Tabelle 16:	Bilanzierung der Substanzen im Abwasser, bezogen auf eine 100 m ³ Fermentation inkl. vollständiger Reinigung.....	74

Tabelle 17:	Bilanzierung der Menge an Feststoff und Wasser im Abwasser, bezogen auf eine 100 m ³ Fermentation inkl. vollständiger Reinigung.....	75
Tabelle 18:	Konzentration der im Abwasser enthaltenen chemischen Elemente	75
Tabelle 19:	Konzentration der im Abwasser enthaltenen chemischen Elemente	76
Tabelle 20:	Zusammenstellung der Stromaufnahme und der erzeugten Wärmemengen der Rührwerke (5 m ³ Batch)	77
Tabelle 21:	Strombedarf und erzeugte Wärme bei der Filtration (5 m ³ Batch).....	78
Tabelle 22:	Zusammenstellung der Stromaufnahme der Pumpen (5 m ³ Batch).....	79
Tabelle 23:	Zusammenstellung der Stromaufnahme und Wärmemengen weiterer Prozessgeräte (5 m ³ Batch).....	79
Tabelle 24:	Zusammenfassung abzuführender Wärmemengen pro 5 m ³ Batchvolumen	81
Tabelle 25:	Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen pro 5 m ³ Batchvolumen	81
Tabelle 26:	Zusammenfassung elektrischer und thermischer Energie pro 5 m ³ Batchvolumen....	82
Tabelle 27:	Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen für 5 m ³ Batchvolumen.....	82
Tabelle 28:	Ausbeute der Proteinreinigung	83
Tabelle 29:	Zusammenhang Ausbeute Fermentation und Ausbeute Reinigung.....	83
Tabelle 30:	Abgeschätzte Genauigkeit der Werte der Anlagenplanung	84
Tabelle 31:	Bilanzparameter der Herstellung des rekombinanten Spinnenseidenproteins bezogen auf 5 m ³ Fermentationsvolumen	99
Tabelle 32:	Vorhandene Materialien in der ecoInvent-Datenbank.....	101
Tabelle 33:	Materialien über chemische Synthese aus Materialien in der ecoInvent-Datenbank	102
Tabelle 34:	Energien, Prozessmedien und Transport ohne Auswahl in der ecoInvent-Datenbank	103
Tabelle 35:	Energien, Prozessmedien und Transport mit Auswahl in der ecoInvent-Datenbank	104
Tabelle 36:	Konzentration des Abwassers der Ernte und Filtration	105
Tabelle 37:	Konzentration des Abwassers der Equipment-Reinigung	105
Tabelle 38:	Konzentration des harnstoffhaltigen Abwassers.....	105
Tabelle 39:	Materialien der Gutschrift „Düngemittel“ & „Natriumchlorid in Lösung“, Allokation jeweils zu 50%.....	108
Tabelle 40:	Bilanzparameter zur Durchführung der Gutschriften	108
Tabelle 41:	Stromaufnahme der Separatoren (5 m ³ Batch)	109
Tabelle 42:	Bilanzparameter für die Ernte mit fünf kleinen Separatoren.....	110
Tabelle 43:	Bilanzparameter für die Filtration mit Rohrmodul.....	111
Tabelle 44:	Bilanzparameter für die Filtration mit Keramikmodul	111
Tabelle 45:	Verschiedene Filtermaterialien, deren Porengröße und Verfügbarkeit des Datensatzes bei ecoInvent.....	112
Tabelle 46:	Bilanzparameter für die Filtration mit Rohrmodul.....	112
Tabelle 47:	Bilanzparameter für CIP ohne Wärmerückgewinnung.....	113
Tabelle 48:	Bilanzparameter für verschiedene Ausbeuten	113
Tabelle 49:	Bilanzparameter der Herstellung des Spinnenseiden-Gewebes.....	114
Tabelle 50:	Bilanzparameter des Einsatzes des Spinnenseiden-Gewebes	115
Tabelle 51:	Bilanzparameter für die Einsparung an Polypropylen Gewebe.....	116
Tabelle 52:	Material- und Energiefluss für 1 kg Spinnenseide „cradle-to-gate“	120
Tabelle 53:	Prozentuale Verteilung der Energien nach Prozessschritt	121
Tabelle 54:	Ergebnisse für die Herstellung der Spinnenseide in den verschiedenen Wirkungskategorien und Methoden	122
Tabelle 55:	Prozentuale Verteilung in kg der Materialien (ohne techn. Wasser).....	123
Tabelle 56:	Einsparung und Mehraufwand durch Aufbereitung des Harnstoffs	123
Tabelle 57:	Vorteil des Recyclings von Harnstoff im Prozess im Vergleich zu der Gesamtbilanz der Herstellung der Spinnenseiden	124
Tabelle 58:	Ungewichtete summierte prozentuale Anteile der Beiträge aller Rohstoffe, Energien und Prozessmedien in den betrachteten Wirkungskategorien	125
Tabelle 59:	Prozentualer Anteil in den betrachteten Wirkungskategorien bei der Erzeugung aller Rohstoffe und Energien.....	126
Tabelle 60:	Größte Verursacher der Emissionen in den verschiedenen Wirkungskategorien.....	127
Tabelle 61:	Abwassermodule im Vergleich.....	129

Tabelle 62:	Anteil des Transports an den Gesamtemissionen	130
Tabelle 63:	Faktoren für die Fehlerbetrachtung für Materialien über chemische Synthese aus ecoInvent-Modulen.....	131
Tabelle 64:	Gegenüberstellung der ecoInvent-Module für Zucker.....	132
Tabelle 65:	Gegenüberstellung der ecoInvent-Module für Strom und Wärme	132
Tabelle 66:	Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung bezüglich des Materialbedarfs	133
Tabelle 67:	Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung bezüglich der Energien	134
Tabelle 68:	Zusammenfassung des Einflusses der Fehlerabschätzung bei der Prozessbetrachtung	136
Tabelle 69:	Vergleich des Massenanteils der Rohstoffe zur Produktion rekombinanter Spinnenseide mit deren Einfluss in ausgewählten Wirkungskategorien	137
Tabelle 70:	Einsparung, Mehraufwand und Allokationen durch Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittels	138
Tabelle 71:	Einfluss auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung bei der Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittelauf..	139
Tabelle 72:	Anteile der an der Gutschrift beteiligten Rohstoffe, Energien und Medien zur Aufbereitung des Abwassers zur Durchführung der Gutschrift mit Verwendung als Düngemittel	140
Tabelle 73:	Anteile der Aufbereitung des Abwassers der Equipment-Reinigung.....	141
Tabelle 74:	Einfluss der Gutschrift „NaCl-Lösung“ auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung	141
Tabelle 75:	Einfluss der Gutschrift „Düngemittel“ auf das Ergebnis der Wirkungsabschätzung	142
Tabelle 76:	Energien beim Einsatz von fünf kleinen Separatoren in Vergleich zu einem großen Separator.....	144
Tabelle 77:	Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit fünf kleinen Separatoren im Vergleich zu einem großen Separator.....	144
Tabelle 78:	Material- und Energiefluss für 1 kg Spinnenseide mit Rohrmodul-Filtration.....	145
Tabelle 79:	Beteiligte Rohstoffe und Energien beim Einsatz eines Rohrmoduls im Vergleich zu einem Keramik-Modul für die Filtration	146
Tabelle 80:	Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit Rohrmodul-Filtration im Vergleich zu Keramik-Modul-Filtration	147
Tabelle 81:	Vergleich des Medien- und Energieverbrauchs für den Prozessschritt Filtration inkl. CIP und Abwasserreinigung für Keramik- und Rohrmodul.....	147
Tabelle 82:	Vergleich der Wirkungsabschätzung des Prozessschritts Filtration mit Keramik- und mit Rohrmodul inkl. der Filterelemente	148
Tabelle 83:	Vergleich der Wirkungsabschätzung des Prozessschritts Filtration mit Keramik- und mit Rohrmodul inkl. Filterelemente	149
Tabelle 84:	Energien bei ausgesetzter Wärmerückgewinnung bei CIP.....	149
Tabelle 85:	Vergleich der Wirkungsabschätzung der Herstellung von Spinnenseide mit und ohne Wärmerückgewinnung beim CIP	150
Tabelle 86:	Vergleich der verschiedenen Ausbeuten beim Produktionsprozess von Spinnenseide pro kg Spinnenseide.....	151
Tabelle 87:	Material- und Energiefluss für einen Spinnenseide-Submikrofilter „cradle-to-grave“	155
Tabelle 88:	Wirkungsabschätzung des Spinnenseiden-Submikrogewebes und Gutschriften pro Haushalt.....	156
Tabelle 89:	Umweltentlastungspotential des Spinnenseiden-Submikrogewebes „cradle-to-grave“ pro Jahr	157
Tabelle 90:	Vergleich von Spinnenseide mit Polyamid 6,6 „cradle-to-gate“ in ausgewählten Wirkungskategorien - Absolutwerte.....	159
Tabelle 91:	Anteil der Strom- und Wärmebereitstellung an den Gesamtemissionen für die Produktion künstlicher Spinnenseide	163

14 ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND KONSTANTE GRÖßEN

Verwendete Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
BR	Brasilien
BTM	Biotrockenmasse
CA	Celluloseacetat
CERA	Cumulative Energy Requirements Analysis – kumulierte Energiebedarfsanalyse
CH	Schweiz
CIP	Clean-in-Place
CML	Center of Environmental Sciences of Leiden University, the Netherlands
DEHS	Di-ethyl-hexyl-sebacat
eADF4	Engineered <i>araneus diadematus fibroin</i>
EBIR	<i>Equal benefit incremental reactivity</i> – gleicher Nutzen bei inkrementeller Zunahme
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure
ErP	European directive for energy related products
FAETP	<i>Freshwater aquatic ecotoxicity</i> – Aquatische Süßwasser-Ökotoxizität
FSETP	<i>Freshwater sediment ecotoxicity</i> – Sedimentäre Süßwasser-Ökotoxizität
GWP	<i>Global warming potential</i> – Treibhauspotential
HFIP	1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propanol
HTP	<i>Human toxicity potential</i> – Humantoxizitätspotential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPTG	Isopropyl- β -D-thiogalactopyranosid
KEA	kumulierter Energieaufwand
LCA	Life cycle assessment
MAETP	<i>Marine aquatic ecotoxicity</i> – Äquatische Seewasser-Ökotoxizität
MIR	<i>Maximum incremental reactivity</i> – Maximale inkrementale Zunahme
MSETP	<i>Marine sediment ecotoxicity</i> – Sedimentäre Seewasser-Ökotoxizität
MOIR	<i>Maximum ozone incremental reactivity</i> – Maximale inkrementale Zunahme an Ozon
OCE	Übersee
ODP	<i>Ozone depletion potential</i> – Ozonabbaupotential
OUR	<i>Oxygen uptake rate</i> – Sauerstoffaufnahme
PC	Polycarbonat
PCL	Polycaprolacton
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PHA	Polyhydroxyalkanoates
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
REM	Rasterelektronenmikroskop
RER	Europa
SETAC	Society for Environmental Toxicology and Chemistry
SIP	Steam-in-Place
TAETP	<i>Terrestrial ecotoxicity</i> – Boden-Ökotoxizität
VOC	volatile organic compound
WMO	World Meteorological Organization
UCTE	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
USEP	United Nations Environment Programme
USEtox	UNSP-SETAC toxicity model

Verwendete Formelzeichen und konstante Größen

A	Fläche [m ²]
c_X	Konzentration [g/l]
c_p	spezifische Wärmekapazität $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
d_i	Dicke einer Schicht im Bauteil [m]
D_X, d	Durchmesser [m]
D	Diafiltrationsfaktor
E	Leistungsbedarf [kWh]
g	Erdbeschleunigung [9,81 m/s ²]
$\Delta H_{0,Substanz}$	Standardbildungsenthalpie [kJ/g]
H_X, h	Höhe [m]
$\Delta H_{Wärme,Substanz}$	Freigesetzte Wärme durch Bildung des Substrats [kJ]
$k_L a$	Stoffübergangskoeffizient [1/s]
k_W	Wärmedurchgangskoeffizient $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$
\dot{m}	Fluxleistung [l/(m ² *h)]
Δm_X	Masse eines Stoffes X [kg]
M_X	Molare Masse eines Stoffes X $\left[\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right]$
Ne_0	Newtonzahl [4,7]
P_X	elektrische Leistung [kWh]
Δp	Druckdifferenz [bar]
p_o	Druck bei Standardbedingungen (1.031 mbar) [bar]
p_X	Partialdruck des Lösungsmittels [bar]
Q_R	Wärmeeintrag durch das Rührwerk [kJ]
Q	Wärmeverlust [kWh]
$\Delta \dot{Q}$	Wärmestrom [kJ]
ΔQ	Wärmemenge [kJ]
R	spezifisches Rückhaltevermögen der Membran
R_T	Wärmedurchlasswiderstand $\left[\frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}\right]$
R_{Si}	innerer Wärmedurchlasswiderstand $\left[\frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}\right]$
R_i	Wärmedurchlasswiderstand $\left[\frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}\right]$ einer Schicht
R_{se}	äußerer Wärmedurchlasswiderstand $\left[\frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}\right]$
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
$t_{Abkühlen}$	Abkühlzeitspanne [s]
Δt	Dauer des Wärmeverlusts [t]
U	„U-Wert“ entspricht dem Wärmedurchgangskoeffizient "k" $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}}\right]$
$V(t)$	zu verarbeitendes Volumen [m ³]
V	Arbeitsvolumen [m ³]
\dot{V}_{Zulauf}	Volumenstrom im Zulauf in [l/h]
V_D	Diafiltrationsvolumen [l]
V_X	Volumen das filtriert wird [l]

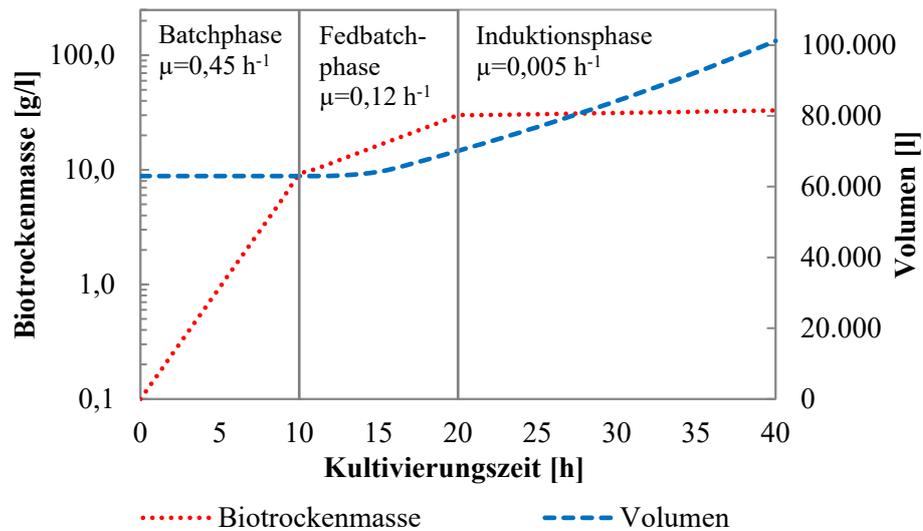
\dot{V}	Volumenstrom [l/h]
V_m	Molares Volumen [mol/l]
X	Aufkonzentrierfaktor
X_0	Biotrockenmasse bei Fermentationsstart [g/l]
ε	Leistungsdichte [W/kg]
λ_i	Wärmeleitfähigkeit des Stoffes [W/(m·K)]
σ	Grenzflächenspannung [0,072 N/m]
ρ_X	Dichte [kg/m ³]
μ	Wachstumsrate [1/h]
ν_f	kinematische Viskosität [10 ⁻⁶ m ² /s]
w_{Be}	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit [0,23 m/s]
$\Delta_v H_0$	Verdampfungsenthalpie [kJ]

15 ANHANG

Anhang A Daten zu Wachstum und Volumenzunahme im 100.000 l Fermenter**Tabelle Anhang 1: Datenpunkte für Wachstum und Volumenzunahme im 100.000 l Fermenter**

Zeit [h]	Wachstumsrate [1/h]	Volumen [l]	Biotrockenmasse [g/l]	OD* [-]
0	0,45	63.000	0,10	0,3
1	0,45	63.000	0,16	0,5
2	0,45	63.000	0,25	0,7
3	0,45	63.000	0,39	1,2
4	0,45	63.000	0,60	1,8
5	0,45	63.000	0,95	2,8
6	0,45	63.000	1,49	4,5
7	0,45	63.000	2,33	7,0
8	0,45	63.000	3,66	11,0
9	0,45	63.000	5,74	17,2
10	0,45	63.000	9,00	27,0
11	0,12	63.016	10,15	30,4
12	0,12	63.079	11,44	34,3
13	0,12	63.268	12,90	38,7
14	0,12	63.648	14,55	43,6
15	0,12	64.220	16,40	49,2
16	0,12	65.184	18,49	55,5
17	0,12	66.390	20,85	62,6
18	0,12	67.618	23,51	70,5
19	0,12	68.869	26,51	79,5
20	0,12	70.143	29,89	89,7
21	0,005	71.440	30,04	90,1
22	0,005	72.762	30,19	90,6
23	0,005	74.108	30,34	91,0
24	0,005	75.479	30,49	91,5
25	0,005	76.876	30,64	91,9
26	0,005	78.298	30,80	92,4
27	0,005	79.746	30,95	92,9
28	0,005	81.222	31,11	93,3
29	0,005	82.724	31,26	93,8
30	0,005	84.255	31,42	94,3
31	0,005	85.813	31,58	94,7
32	0,005	87.401	31,73	95,2
33	0,005	89.018	31,89	95,7
34	0,005	90.665	32,05	96,2
35	0,005	92.342	32,21	96,6
36	0,005	94.050	32,38	97,1
37	0,005	95.790	32,54	97,6
38	0,005	97.562	32,70	98,1
39	0,005	99.367	32,87	98,6
40	0,005	101.205	33,03	99,1

Zugehörige Abbildung zu Tabelle Anhang 1 (siehe auch Abbildung 26):



Daraus resultierend:

kg trockene Zellmasse	3.342,81
kg nasse Zellmasse	30.085
kg Protein bei 5g/l	506,03

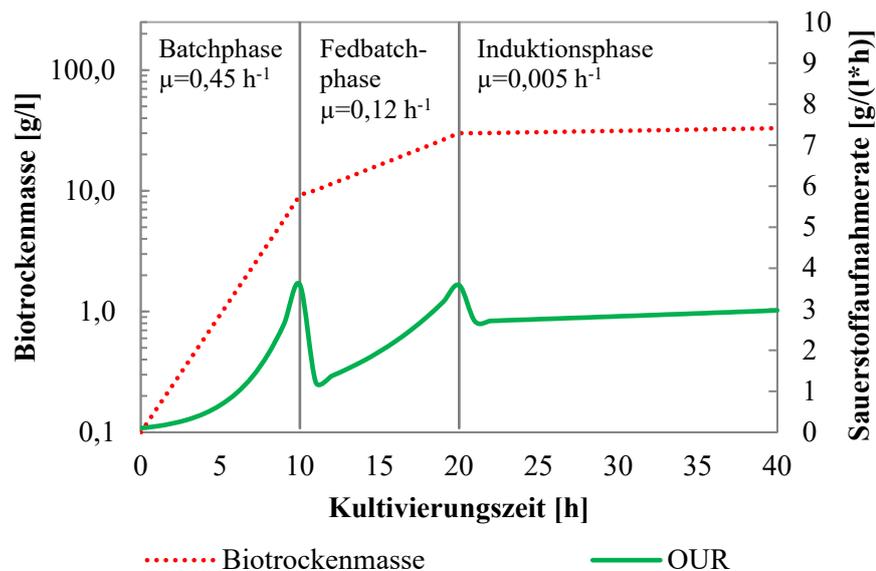
Anhang B Daten zu Wachstum und Sauerstoffverbrauch im 100.000 l Fermenter

Tabelle Anhang 2: Datenpunkte für Wachstum und Sauerstoffverbrauch im 100.000 l Fermenter

Zeit [h]	Wachstumsrate [1/h]	Volumen [l]	Biotrockenmasse [g/l]	Faktor OUR/BTM [1/h]	OUR [g/(l*h)]	Sauerstoffbedarf [kg]
0	0,45	63000	0,10	1,00	0,10	6,30
1	0,45	63000	0,16	0,94	0,15	9,29
2	0,45	63000	0,25	0,88	0,22	13,64
3	0,45	63000	0,39	0,82	0,32	19,93
4	0,45	63000	0,60	0,76	0,46	28,97
5	0,45	63000	0,95	0,70	0,66	41,84
6	0,45	63000	1,49	0,64	0,95	60,00
7	0,45	63000	2,33	0,58	1,35	85,27
8	0,45	63000	3,66	0,52	1,90	119,90
9	0,45	63000	5,74	0,46	2,64	166,34
10	0,45	63000	9,00	0,40	3,60	226,84
11	0,12	63016	10,15	0,12	1,22	76,75
12	0,12	63079	11,44	0,12	1,37	86,62
13	0,12	63268	12,90	0,12	1,55	97,96
14	0,12	63648	14,55	0,12	1,75	111,11
15	0,12	64220	16,40	0,12	1,97	126,40
16	0,12	65184	18,49	0,12	2,22	144,66
17	0,12	66390	20,85	0,12	2,50	166,12
18	0,12	67618	23,51	0,12	2,82	190,76
19	0,12	68869	26,51	0,12	3,18	219,06
20	0,12	70143	29,89	0,12	3,59	251,56
21	0,005	71440	30,04	0,09	2,70	193,12

22	0,005	72762	30,19	0,09	2,72	197,68
23	0,005	74108	30,34	0,09	2,73	202,35
24	0,005	75479	30,49	0,09	2,74	207,13
25	0,005	76876	30,64	0,09	2,76	212,02
26	0,005	78298	30,80	0,09	2,77	217,02
27	0,005	79746	30,95	0,09	2,79	222,14
28	0,005	81222	31,11	0,09	2,80	227,39
29	0,005	82724	31,26	0,09	2,81	232,75
30	0,005	84255	31,42	0,09	2,83	238,25
31	0,005	85813	31,58	0,09	2,84	243,87
32	0,005	87401	31,73	0,09	2,86	249,63
33	0,005	89018	31,89	0,09	2,87	255,52
34	0,005	90665	32,05	0,09	2,88	261,55
35	0,005	92342	32,21	0,09	2,90	267,73
36	0,005	94050	32,38	0,09	2,91	274,05
37	0,005	95790	32,54	0,09	2,93	280,52
38	0,005	97562	32,70	0,09	2,94	287,14
39	0,005	99367	32,87	0,09	2,96	293,92
40	0,005	101205	33,03	0,09	2,97	300,85

Zugehörige Abbildung zu Tabelle Anhang 2 (siehe auch Abbildung 27):



Daraus resultierend:

kg Sauerstoff	7113,9	kg
Glucose batch	1112,0	kg
Glucose fedbatch	3058,5	kg
Glucose Induktion	7332,2	kg
Glucose gesamt	11502,6	kg
Biomasse	3342,8	kg
Wärme durch O ₂	102262,5	MJ
Wärme durch Glucose BTM	102422,6	MJ

Anhang C Daten zum Wachstum und Sauerstoffverbrauch in den VorfermenternTabelle Anhang 3: **Datenpunkte für Wachstum und Sauerstoffverbrauch in den Vorfermentern**

Zeit [h]	Wachstumsrate [1/h]	Volumen [l]	Biotrockenmasse [g/l]	OD (BTMx3) [-]	Faktor OUR/BTM [1/h]	OUR [g/(l*h)]	Sauerstoffbedarf [kg]
0	0,45	1000	0,10	0,3	0,25	0,03	0,03
1	0,45	1000	0,16	0,5	0,25	0,04	0,04
2	0,45	1000	0,25	0,7	0,25	0,06	0,06
3	0,45	1000	0,39	1,2	0,25	0,10	0,10
4	0,45	1000	0,60	1,8	0,25	0,15	0,15
5	0,45	1000	0,95	2,8	0,25	0,24	0,24
6	0,45	1000	1,49	4,5	0,25	0,37	0,37
7	0,45	1000	2,33	7,0	0,25	0,58	0,58
8	0,45	1000	3,66	11,0	0,25	0,91	0,91
9	0,45	1000	5,74	17,2	0,25	1,43	1,43
10	0,45	1000	9,00	27,0	0,25	2,25	2,25

Daraus resultierend:

Wärmeentwicklung Summe

87,25 MJ

Sauerstoffverbrauch Summe

6,84 kg

Anhang D Daten zu Wachstum, Leistungsdichte, Begasungsrate und Stoffübergangskoeffizient im 100.000 l Fermenter

Verwendete Parameter für die Berechnung:

Ne0	4,7	-	Newtonzahl unbegast
Z	0,575	-	Leistungsparameter
Ne	3,98	-	Newtonzahl begast
ρ	1.050	kg/m ³	Dichte
$k_{l,a}$	0,02	1/s	Stoffübergangskoeffizient in Wasser
D	3,960	m	Behälterinnendurchmesser
d	1,267	m	Rührerdurchmesser
h	0,253	m	Rührerhöhe
ε	4,51	m ² /s ³ =W/kg	Leistungsdichte

Tabelle Anhang 4: Datenpunkte für Wachstum, Leistungsdichte, Begasungsrate und Stoffübergangskoeffizient im 100.000 l Fermenter

Zeit [h]	Wachstumsrate [1/h]	Volumen [l]	Bio-trocken-masse [g/l]	Leistung Rührer begast [kW]	Drehzahl [1/s]	Leistung Rührer unbegast [kW]	Begasungsrate [m ³ /h]	kla Fermentation [1/s]
0	0,45	63000	0,10	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
1	0,45	63000	0,16	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
2	0,45	63000	0,25	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
3	0,45	63000	0,39	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
4	0,45	63000	0,60	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
5	0,45	63000	0,95	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
6	0,45	63000	1,49	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
7	0,45	63000	2,33	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
8	0,45	63000	3,66	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
9	0,45	63000	5,74	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
10	0,45	63000	9,00	298,42	2,80	352,65	193,20	0,063
11	0,12	63016	10,15	298,49	2,80	352,74	193,27	0,063
12	0,12	63079	11,44	298,79	2,80	353,09	193,52	0,063
13	0,12	63268	12,90	299,69	2,80	354,15	194,30	0,063
14	0,12	63648	14,55	301,49	2,81	356,28	195,85	0,063
15	0,12	64220	16,40	304,20	2,81	359,48	198,21	0,063
16	0,12	65184	18,49	308,76	2,83	364,88	202,18	0,063
17	0,12	66390	20,85	314,47	2,85	371,63	207,18	0,063
18	0,12	67618	23,51	320,29	2,86	378,50	212,31	0,063
19	0,12	68869	26,51	326,22	2,88	385,50	217,56	0,063
20	0,12	70143	29,89	332,25	2,90	392,63	222,95	0,063
21	0,005	71440	30,04	338,40	2,92	399,90	228,46	0,063
22	0,005	72762	30,19	344,66	2,93	407,30	234,11	0,063
23	0,005	74108	30,34	351,03	2,95	414,83	239,91	0,063
24	0,005	75479	30,49	357,53	2,97	422,51	245,84	0,063
25	0,005	76876	30,64	364,14	2,99	430,32	251,93	0,063
26	0,005	78298	30,80	370,88	3,01	438,28	258,16	0,063
27	0,005	79746	30,95	377,74	3,03	446,39	264,55	0,063
28	0,005	81222	31,11	384,73	3,04	454,65	271,09	0,063
29	0,005	82724	31,26	391,85	3,06	463,06	277,80	0,063
30	0,005	84255	31,42	399,10	3,08	471,63	284,67	0,063
31	0,005	85813	31,58	406,48	3,10	480,35	291,72	0,063
32	0,005	87401	31,73	414,00	3,12	489,24	298,93	0,063
33	0,005	89018	31,89	421,66	3,14	498,29	306,33	0,063
34	0,005	90665	32,05	429,46	3,16	507,51	313,91	0,063
35	0,005	92342	32,21	437,40	3,18	516,90	321,68	0,063
36	0,005	94050	32,38	445,50	3,20	526,46	329,64	0,063
37	0,005	95790	32,54	453,74	3,22	536,20	337,79	0,063
38	0,005	97562	32,70	462,13	3,24	546,12	346,15	0,063
39	0,005	99367	32,87	470,68	3,26	556,22	354,71	0,063
40	0,005	101205	33,03	479,39	3,28	566,51	363,49	0,063

Anhang E Berechnung der Gesamtmenge an Glucose

$$m_{\text{Glucose, batch}} = \frac{m_{\text{BTM, Ende, batch}}}{Y_{X/S}^{\text{batch}}} = \frac{V_{\text{Ende, batch}} \cdot X_{\text{Ende, batch}}}{Y_{X/S}^{\text{batch}}} = \frac{63.000 \text{ l} \cdot 9,00 \frac{\text{g}}{\text{l}}}{0,51}$$

$$= 1.112,0 \text{ kg}$$

$$m_{Glucose,fed-batch} = \frac{m_{BTM,Ende,fed-batch} - m_{BTM,Ende,batch}}{Y_{X/S}^{fed-batch}} = \frac{70.143 \text{ l} \cdot 29,89 \frac{\text{g}}{\text{l}} - 567.000 \text{ g}}{0,5}$$

$$= 3.058,5 \text{ kg}$$

$$m_{Glucose,ind} = \frac{m_{BTM,Ende,ind} - m_{BTM,fed-batch}}{Y_{X/S}^{ind}} = \frac{101.205 \text{ l} \cdot 33,03 \frac{\text{g}}{\text{l}} - 2.096.574 \text{ g}}{0,32}$$

$$= 7.332,2 \text{ kg}$$

$$m_{Glucose,gesamt} = 1.112,0 \text{ kg} + 3.058,5 \text{ kg} + 7.332,2 \text{ kg} = 11.502,6 \text{ kg}$$

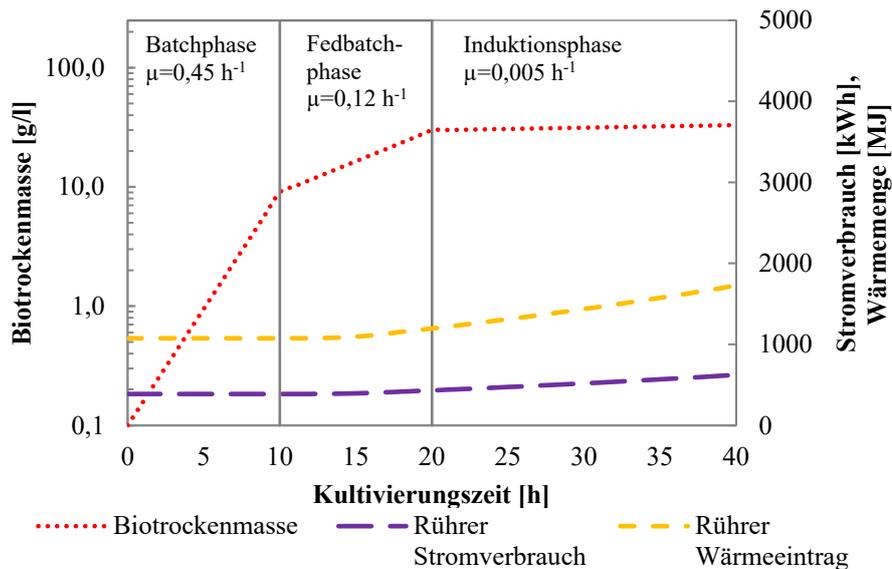
Anhang F Daten zu Wachstum, Stromverbrauch und Wärmeeintrag im 100.000 l Fermenter

Tabelle Anhang 5: Datenpunkte für Wachstum, Stromverbrauch und Wärmeeintrag im 100.000 l Fermenter

Zeit [h]	Wachstumsrate [1/h]	Volumen [l]	Bio-trockenmasse [g/l]	Rührer Stromverbrauch [kWh]	Rührer Wärmeeintrag [MJ]
0	0,45	63000	0,10	387,94	1074,30
1	0,45	63000	0,16	387,94	1074,30
2	0,45	63000	0,25	387,94	1074,30
3	0,45	63000	0,39	387,94	1074,30
4	0,45	63000	0,60	387,94	1074,30
5	0,45	63000	0,95	387,94	1074,30
6	0,45	63000	1,49	387,94	1074,30
7	0,45	63000	2,33	387,94	1074,30
8	0,45	63000	3,66	387,94	1074,30
9	0,45	63000	5,74	387,94	1074,30
10	0,45	63000	9,00	387,94	1074,30
11	0,12	63016	10,15	388,04	1074,57
12	0,12	63079	11,44	388,43	1075,65
13	0,12	63268	12,90	389,59	1078,87
14	0,12	63648	14,55	391,93	1085,35
15	0,12	64220	16,40	395,46	1095,11
16	0,12	65184	18,49	401,39	1111,54
17	0,12	66390	20,85	408,82	1132,10
18	0,12	67618	23,51	416,38	1153,05
19	0,12	68869	26,51	424,08	1174,38
20	0,12	70143	29,89	431,93	1196,11
21	0,005	71440	30,04	439,92	1218,23
22	0,005	72762	30,19	448,06	1240,77
23	0,005	74108	30,34	456,35	1263,73
24	0,005	75479	30,49	464,79	1287,10
25	0,005	76876	30,64	473,39	1310,92
26	0,005	78298	30,80	482,14	1335,17
27	0,005	79746	30,95	491,06	1359,87
28	0,005	81222	31,11	500,15	1385,03
29	0,005	82724	31,26	509,40	1410,65
30	0,005	84255	31,42	518,83	1436,75
31	0,005	85813	31,58	528,42	1463,33
32	0,005	87401	31,73	538,20	1490,40

33	0,005	89018	31,89	548,16	1517,97
34	0,005	90665	32,05	558,30	1546,05
35	0,005	92342	32,21	568,63	1574,65
36	0,005	94050	32,38	579,14	1603,79
37	0,005	95790	32,54	589,86	1633,46
38	0,005	97562	32,70	600,77	1663,67
39	0,005	99367	32,87	611,89	1694,45
40	0,005	101205	33,03	623,21	1725,80
			Summe	18.834,06	52.155,85

Zugehörige Abbildung zu Tabelle Anhang 5:



Anhang G Berechnung der Leistungsdichte des Rührers im Fermenter

Daten des Fermenters: ein Rührbehälter mit normalen Stromstörern und mit Wasser gefüllt

$H_{max.Flüssigkeitsstand} = 7,92 \text{ m}$	Höhe max. Flüssigkeitsstand
$D_{innen} = 3,96 \text{ m}$	Behälterdurchmesser, innen
$H/D = 2,0$	Höhe zu Durchmesser Verhältnis
$V = 100 \text{ m}^3$	Arbeitsvolumen

Daten des Scheibenrührers im Fermenter:

$d = 0,32 \cdot D = 1,267 \text{ m}$	Durchmesser des Rührers
$h = 0,2 \cdot d = 0,253 \text{ m}$	Höhe des Rührers
$h_B = D/6 = 0,66 \text{ m}$	Abstand des Rührers über dem Behälterboden
$Ne_0 = 4,7$	Newtonzahl (wegen Ähnlichkeit der Behälter)
$w_{Be} = 0,23 \text{ m/s}$	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit
$C_3 = C_3(Sc) = const. = 1,4 \cdot 10^{-5}$	Konstante
$\nu_f = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität
$g = 9,81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$\sigma = 0,072 \text{ N/m}$	Grenzflächenspannung

$$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Dichte der Lösung

$$k_L a = 0,2 \text{ 1/s}$$

Stoffübergangskoeffizient

$$\varepsilon = \frac{g \cdot w_{Be}}{d/D} \cdot \frac{k_L a \cdot \left(\frac{v_f}{g^2}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{C_3 \cdot \left(\frac{(\sigma/\rho_f)^3}{g \cdot v_f^4}\right)^{\frac{1}{12}}}} \varepsilon = 4,51 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} = 4,51 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Einheitenprüfung ε

$$\frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} = \frac{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{m/m}} \cdot \frac{\frac{1}{\text{s}} \cdot \left(\frac{\frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)^2}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}^2} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)^3}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)^4}\right)^{\frac{1}{12}}}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} \cdot \frac{\frac{1}{\text{s}} \cdot \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \cdot \frac{\text{s}^4}{\text{m}^2}\right)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}^2}\right)^3}{\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{\text{m}^8}{\text{s}^4}}\right)^{\frac{1}{12}}}} = \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3} \cdot \frac{\frac{1}{\text{s}} \cdot (\text{s}^3)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\left(\frac{\frac{\text{m}^9}{\text{s}^6}}{\frac{\text{m}^9}{\text{s}^6}}\right)^{\frac{1}{12}}}} = \frac{\text{m}^2 \cdot \text{kg}}{\text{s}^3 \cdot \text{kg}} = \frac{\text{W}}{\text{kg}}$$

Um zu überprüfen, ob die gewählten Parameter technisch durchführbar sind, sollen die notwendige Drehzahl, Begasungsrate und der reale Stoffübergangswert berechnet werden.

Zur Berechnung der Drehzahl wird die Formel zur Berechnung der Leistung nach der Drehzahl umgestellt.

$$n = \sqrt[3]{\frac{P_g}{Ne \cdot \rho \cdot d^5}}$$

Die Drehzahl nimmt zwischen 168 1/min am Anfang der Fermentation und 197 1/min am Ende der Fermentation zu (Anhang D). Dieser Wert ist technisch durchführbar.

Für die Begasungsrate muss zunächst die Leistung des Rührers im unbegasteten Zustand berechnet werden:

$$P_{ug} = Ne_0 \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5$$

Die Newtonzahl im begasteten Zustand berechnet sich mit der Leistungskennzahl ($h_B/D=0,17$):

$$Ne = \frac{Ne_0}{\sqrt{1 + 1,2 \cdot Z^2}}$$

Begasungsrate Q (Korrelation vorgeschlagen durch Hughmark 1980⁸¹):

$$Q = n \cdot V \cdot \left(\frac{0,1 \cdot P_{ug}}{P_g \cdot \left(\frac{n^2 \cdot d^4}{g \cdot h \cdot V^{2/3}}\right)^{1/6}} \right)^4$$

Die Begasungsrate liegt zwischen 193 und 363 m³/h (Anhang D) und ist ebenso technisch machbar.

Der Stoffübergangskoeffizient kann mit einer Korrelation von Schaepe et al. 2011⁷⁵ für Fermentationslösungen berechnet werden:

$$k_L a = 2,79 \cdot \left(\frac{P_g}{V}\right)^{0,72}$$

$$k_L a = 2,79 \cdot \left(\frac{352,65 \text{ kW}}{63.000 \text{ l}}\right)^{0,72} = 0,063 \frac{1}{s} = 227 \frac{1}{h}$$

Dies entspricht einem Stoffkoeffizienten sehr hoher Güte, der ausreicht, um die *E. coli*-Bakterien mit Sauerstoff zu versorgen⁸⁰.

Anhang H Mengen an Medien und Rohstoffen bei der Fermentation

Tabelle Anhang 6: Menge der Einsatzstoffe bei der Fermentation in der Batchphase

Fermentationsmedium Batch	Menge pro l
Magnesiumsulfat	1,20 g
Kaliumdihydrogenphosphat	13,30 g
Ammoniumhydrogephosphat	4,00 g
Zitronensäure	1,70 g
Kanamycin	35,00 mg
25% Ammoniak	17,40 ml

Tabelle Anhang 7: Berechnete Mengen für die Fermentationen in der Batchphase

	10 l	100 l	1.000 l	100.000 l	Einheit
Medien Batch	10	100	1.000	63.000	l
Volumen Inoculum	0,50	10,0	100,0	1.000	l
Wasser technisch	9,63	96,4	964,2	60.636	kg
Glucose	0,18	1,8	17,7	1.112	kg
Glucoselösung	0,43	4,3	43,1	2.715	l
Magnesiumsulfat	0,01	0,1	1,1	74	kg
Magnesiumsulfatlösung	0,06	0,5	5,4	372	l
Kaliumdihydrogenphosphat	0,13	1,2	12,0	825	kg
Ammoniumhydrogephosphat	0,04	0,4	3,6	248	kg
Zitronensäure	0,02	0,2	1,5	105	kg
Salzlösung	0,42	4,0	39,9	2.749	l
Kanamycin	0,00	0,0	0,0	2	kg
25% Ammoniak	0,17	0,2	0,2	1.096	l

Tabelle Anhang 8: Menge der Einsatzstoffe bei der Fermentation nach der Batchphase

Fermentationsmedium Batch	Menge pro l
Glucose	300 g
Magnesiumsulfat	53 g
25% Ammoniak	47,3 ml
IPTG (Bez. auf Start Ind.)	238,30 mg

Tabelle Anhang 9: Berechnete Mengen für die Fermentation nach der Batchphase

100.000 l Fermentation		
Medien Fed-Batch	38.205,50	l
Wasser technisch	25.789,95	kg
Glucose für Fedbatch	3.058,47	kg
Glucose für Induktion	7.332,19	kg
Glucoselösung	25.366,41	l
Magnesiumsulfat	2.024,89	kg
Magnesiumsulfatlösung	10.124,46	l
IPTG (Bez. auf Start Ind.)	17,34	kg
25% Ammoniak	1.807,12	l

Anhang I Zusammenfassung der Parameter der Fermentation

Alle bei der Fermentation verwendeten und berechneten Parameter sind in Tabelle Anhang 10 zusammengefasst.

Tabelle Anhang 10: Zusammenfassung der bei der Fermentation verwendeten Parameter

Parameter	Beschreibung	Verwendeter Wert	Ursprung
$C_{BTM,0}$	Start-BTM-Konzentration	0,1 g/l	AmSilk
μ_B	Wachstumskoeffizient Batch	0,45 h ⁻¹	18
μ_{FB}	Wachstumskoeffizient Fedbatch	0,12 h ⁻¹	AmSilk
μ_I	Wachstumskoeffizient Induktion	0,005 h ⁻¹	AmSilk
$C_{BTM,Ende}$	End-BTM-Konzentration	33,03 g/l	berechnet
$m_{BTM,Ende}$	End-BTM-Menge	3.343 kg	berechnet
Y_{X/S_B}	Ausbeutekoeffizient Batch	0,51	18
$Y_{X/S_{FB}}$	Ausbeutekoeffizient Fedbatch	0,5	AmSilk
Y_{X/S_I}	Ausbeutekoeffizient Induktion	0,17	berechnet
$\Delta H_{0,O_2}$	Wärmefreisetzung Sauerstoffatmung	14,375 kJ/g O ₂	74, 75
$m_{O_2,gesamt}$	Gesamtmenge Sauerstoff	7.114 kg	berechnet
$\Delta H_{0,BTM}$	Verbrennungswärme BTM	23,04 kJ/g BTM	76
$\Delta H_{0,Glucose}$	Verbrennungswärme Glucose	15,6 kJ/g Glucose	76
$m_{Glucose,gesamt}$	Gesamtmenge Glucose	11.503 kg	berechnet
$\Delta H_{Wärme,Stoffwechsel}$	Wärmemenge durch Stoffwechsel	102.343 MJ	berechnet
ε	Leistungsdichte	4,51 W/kg	berechnet
V	Arbeitsvolumen Fermenter	100 m ³	gefordert
H/D	Höhe zu Durchmesser Verhältnis	2	gefordert
D	Behälterdurchmesser, innen	3,960 m	berechnet
d	Durchmesser des Rührers	1,267 m	berechnet
Ne_0	Newtonzahl, unbegast	4,7	77
Ne	Newtonzahl, begast	3,98	berechnet
w_{Be}	Blasenaufstiegsgeschwindigkeit	0,32 m/s	berechnet
$k_L a$	Stoffübergangskoeffizient	227 1/h	berechnet
$\Delta H_{Wärme,Rühren}$	Wärmemenge durch Rühren	52.156 MJ	berechnet
P_E	Stromverbrauch elektrisch	18.834 kWh	berechnet

Anhang J Berechnung der Mengen für die Lösungen der ProteinreinigungMenge an Tris für einen Liter Lösung I mit 50 mM

- Tris: Kurzform von Tris(hydroxymethyl)-aminomethan, Molgewicht 121,14 g/mol, Summenformel $C_4H_{11}NO_3$
- Die Zugabe von Salzsäure während der Einstellung des pHs führt zu einer Erwärmung der Lösung: $dpKS/dT = -0.028$
- Eine Verdünnung um einen Faktor von 10 vermindert den pH um 0.1 pH Einheiten

$$m_{Tris} = 0,05 \frac{mol}{l} \cdot 121,14 \frac{g}{mol} \cdot 1l = 6,057g$$

Es müssen 6,057 g Tris für einen Liter Pufferlösung eingewogen werden.

Menge an Salzsäure für einen Liter Lösung I mit pH 8

Tris ist das Äquivalent zur Base A^- and $TrisHCl$ ist das Equivalent zur Säure HA

$$pH = pK_s + \log \frac{[A^-]}{[HA]}$$

$$8,0 = 8,3 + \log \frac{[Tris]}{[TrisHCl]} \quad \rightarrow \quad -0,3 = \lg \frac{[Tris]}{[TrisHCl]} \quad \rightarrow \quad 0,5 = \frac{[TrisHCl]}{[Tris]}$$

$$0,5 \cdot [Tris] = [TrisHCl]$$

Für eine 50 mM Lösung gilt:

$$[Tris] + [TrisHCl] = 0,05M$$

Daraus folgt:

$$0,5 \cdot [TrisHCl] + [Tris] = 0,05M \quad \rightarrow \quad (0,5 + 1) \cdot [TrisHCl] = 0,05M \rightarrow$$

$$[TrisHCl] = 0,0333M \rightarrow [HCl] = 0,0333M$$

Theoretische Menge an HCl (Molmasse 36,36 g/mol): $0,0333 \frac{mol}{l} \cdot 36,36 \frac{g}{mol} \cdot 1l = 1,214g$

Konzentrierte Salzsäure (32 %) besitzt ein Molarität von 10,2 mol/l:

$$\frac{0,0333mol/l}{10,2 mol/l} \cdot 1l = 0,0033l$$

Von 32%iger Salzsäure müssen 0,0033 l einem Liter Tris/HCl-Lösung zugegeben werden, um einen Tris-Puffer mit pH 8,0 herzustellen. Die 32%ige Salzsäure soll in dieser Konzentration bestellt und verwendet werden.

Menge an NaCl für einen Liter Lösung I mit 100 mM

Molmasse NaCl 58,44 g/mol

$$0,1 \frac{mol}{l} \cdot 58,44 \frac{g}{mol} \cdot 1l = 5,844g$$

Es müssen 5,844 g NaCl für einen Liter Pufferlösung eingewogen werden.

Für einen Kubikmeter müssen 5,844 kg Natriumchlorid 6,057 kg Tris und $3,3e-6 m^3$ Salzsäure vorgesehen werden.

Volumen an technischem Wasser für einen Liter Lösung I

$$\text{Endvolumen} - \frac{m_{\text{Tris}}}{\rho_{\text{Tris}}} - V_{\text{HCl}} - \frac{m_{\text{NaCl}}}{\rho_{\text{NaCl}}} = 0,993 \text{ l}$$

$$1 \text{ l} - \frac{6,057 \text{ g}}{1,35 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} - 0,0033 \text{ l} - \frac{5,488 \text{ g}}{2,17 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 1 \text{ l} - 0,00448 - 0,0033 \text{ l} - 0,0025 = 0,989 \text{ l}$$

Zugabe von NaOH zum Lösen der Zellbruchstücke

Volumen nach Filtration 1 beträgt 2.500 l. Die Zielkonzentration an NaOH beträgt 0,05 M und es wird eine Lösung mit 10 M NaOH verwendet.

$$\frac{0,05 \text{ mol/l}}{10 \text{ mol/l}} \cdot 2.500 \text{ l} = 12,5 \text{ l}$$

Zugabe von Urea zum Lösen von Verunreinigungen

Volumen nach der Filtration 2 beträgt 1.000 l. Die Zielkonzentration an Urea beträgt 8 M und wird als Feststoff zugegeben.

Die Volumenzunahme beträgt dadurch:

$$V_{\text{End}} = V_{\text{Lösung}} + V_{\text{Urea}} = V_{\text{Lösung}} - \frac{V_{\text{End}} \cdot M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}}}{\rho_{\text{Urea}}}$$

$$V_{\text{End}} = \frac{V_{\text{Lösung}} \cdot \rho_{\text{Urea}}}{\rho_{\text{Urea}} - M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}}} = \frac{1.000 \text{ l} \cdot 1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 1.000 \frac{\text{cm}^3}{\text{l}}}{1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 1.000 \frac{\text{cm}^3}{\text{l}} - 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 8 \frac{\text{mol}}{\text{l}}} = 1572,34 \text{ l}$$

$$m_{\text{Urea}} = V_{\text{End}} \cdot M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}} = 1.752,34 \text{ l} \cdot 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 8 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 755,5 \text{ kg}$$

Lösung II: 2 M Urea

2 M Urea entspricht 120 g/l,

$$\text{Endvolumen} - \frac{m_{\text{Urea}}}{\rho_{\text{Urea}}}$$

$$1 \text{ l} - \frac{120 \text{ g}}{1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 0,909 \text{ l}$$

10 M NaOH

Die 10 M NaOH Lösung soll in dieser Konzentration bestellt und verwendet werden.

Anhang K Weitere Medien – Berechnung pro m³Glucoselösung

$$V_{\text{Glucose}} = \frac{m_{\text{Glucose}}}{\rho_{\text{Glucose}}} = \frac{409,6 \text{ kg}}{1,54 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,2659 \text{ m}^3$$

Magnesiumsulfatlösung

$$V_{\text{Magnesiumsulfat}} = \frac{m_{\text{Magnesiumsulfat}}}{\rho_{\text{Magnesiumsulfat}}} = \frac{200 \text{ kg}}{2,66 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0752 \text{ m}^3$$

Salze-Lösung

Zielgröße 300 g/l bzw. kg/m³ Kaliumdihydrogenphosphat, eine 22,5-fach konzentrierte Lösung

$$V_{\text{Kaliumdihydrogenphosphat}} = \frac{m_{\text{Kaliumdihydrogenphosphat}}}{\rho_{\text{Kaliumdihydrogenphosphat}}} = \frac{300 \text{ kg}}{2,34 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,1282 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Ammoniumhydrogenphosphat}} = \frac{m_{\text{Ammoniumhydrogenphosphat}}}{\rho_{\text{Ammoniumhydrogenphosphat}}} = \frac{90,2 \text{ g}}{1,62 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0557 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Zitronensäure}} = \frac{m_{\text{Zitronensäure}}}{\rho_{\text{Zitronensäure}}} = \frac{38,3 \text{ g}}{1,665 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,023 \text{ m}^3$$

Volumen von Kanamycin (35mg/l*22,55 = 789,25 mg/l = 0,789 kg/m³) und EDTA (8,4mg/l*22,55/1000 = 0,189 mg/l = 189·10⁻⁶ kg/m³) vernachlässigbar

Reinigungslösung 10 M NaOH

$$V_{\text{Natriumhydroxid}} = \frac{m_{\text{Natriumhydroxid}}}{\rho_{\text{Natriumhydroxid}}} = \frac{400 \text{ g}}{2,13 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}} = 187,8 \text{ l}$$

Anhang L Berechnung der Volumenzunahme durch Harnstoffzugabe bei Filtration 2

Volumen nach der Filtration 2 beträgt 1.000 l. Die Zielkonzentration an Urea beträgt 8 M und wird als Feststoff zugegeben. Die Volumenzunahme beträgt dadurch:

$$V_{\text{End}} = V_{\text{Lösung}} + V_{\text{Urea}} = V_{\text{Lösung}} - \frac{V_{\text{End}} \cdot M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}}}{\rho_{\text{Urea}}}$$

$$V_{\text{End}} = \frac{V_{\text{Lösung}} \cdot \rho_{\text{Urea}}}{\rho_{\text{Urea}} - M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}}} = \frac{1.000 \text{ l} \cdot 1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 1.000 \frac{\text{cm}^3}{\text{l}}}{1,32 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot 1.000 \frac{\text{cm}^3}{\text{l}} - 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 8 \frac{\text{mol}}{\text{l}}} = 1572,34 \text{ l}$$

$$m_{\text{Urea}} = V_{\text{End}} \cdot M_{\text{Urea}} \cdot c_{\text{Urea}} = 1.752,34 \text{ l} \cdot 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 8 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 755,5 \text{ kg}$$

Anhang M Untersuchung unterschiedlicher Filtermedien bei der FiltrationBerechnung der Filtration

Für die Filtration mit Keramik- und Rohrmodulen gibt es mehrere Veröffentlichungen, die rechtfertigen, diese Membranausführung für die Filtration in Betracht zu ziehen und die Eckdaten für die Prozessführung lieferten.

Szenario 1: Filtration mit Keramik-Modulen (als Standard betrachtet)

Szenario 2: Filtration mit Rohrmodulen (z.B. PES, CA, PVDF), für Berechnung Celluloseacetat (CA), weil höchste Proteindurchlässigkeit

- Bailey und Meagher 1997¹⁴: Filtration von *E. coli*-Lysaten nach Zellaufschluss mit einem Hochdruckhomogenisator. Verwendete Filtermembranen: 0,1 µm PES, 0,15 µm CA,

0,2 µm PVDF. Beim PES Hohlfasermodule 0,1 µm mit TMP 27 kPa gehen keine Moleküle, die größer als 80 kDa sind, durch. Unter 1 kDa gehen 100% durch. Ein höherer TMP ist schlecht für die Filterleistung, weil ein Filterkuchen entsteht. Bei PES Flux von 37-68 l/(m²*h) und einem Proteindurchgang von 98-90%. Bei CA Flux von 54-62 l/(m²*h) und Proteindurchgang von 94-96%. Bei PVDF Flux von 89 l/(m²*h) und Proteindurchgang von 23-36%. Es resultierte kein großer Unterschied zwischen Lysat das 1, 2 oder 3 x homogenisiert wurde. Nach 3 x homogenisieren sind 50% der Partikel kleiner als 0,12 µm.

- Bailey und Meagher 2000¹¹⁷: vorzuziehende Membranmaterialien (bei TMP 69 kPa): Bei CA resultiert eine Proteindurchlässigkeit von 95% bei einem Flux von 60 l/(m²*h). Bei 0,1 µm PES resultiert eine Proteindurchlässigkeit von 45% bei einem Flux von 70 l/(m²*h). PVDF, Nylon, PS zeigen schlechtere Werte. Beim Test mit PES Membran und *E. coli*-Lysat nach drei Diafiltrationsvolumen waren 84% der löslichen Proteine durch die Membran (UV₂₈₀-Messung).
- Lee et al. 2004¹¹⁸: Verwendung von Membralox 0,2 µm (Keramikfilter). Der Zellaufschluss wurde chemisch mit Enzym Benzonase unterstützt. 91% der löslichen Proteine wurden entfernt, wobei nahezu kein Verlust an Inclusion Bodies auftrat. Es wurde mit einer Fluxrate von 120 bis 200 l/(m²*h) gearbeitet.

Tabelle Anhang 11: Gegenüberstellung der Ausgangswerte der Auslegung der Filtration

Membransystem	Keramik-Modul	Rohrmodul
<i>R</i> _(Zielprotein)	0,995	0,995
<i>R</i> _(Verunreinigung)	0,197	0,05
<i>C</i> _{Retentat,Verunreinigung}	0,2	0,35
<i>C</i> _{0,Verunreinigung}		

Für eine Fluxleistung von $55 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ berechnet sich die Filterfläche zu 18,18 m² und bei $65 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ zu 15,38 m².

Tabelle Anhang 12: Bedarf an Lösungen und technischem Wasser für die Filtrations-schritte mit Rohrmodul

Medien	Rohrmodul
Wasser	6.344
Lösung I	1.658
Lösung II	1.105
Abwasser	9.676
Abwasser Harnstoff	3.252

Tabelle Anhang 13: Berechneten Werte für die Auslegung der einzelnen Filtrationsstufen für das Rohrmodul

Membransystem	Rohrmodul	
Fluxleistung [l/(m ² *h)]	55	65
Volumenstrom [l/h]	1000	
Filterfläche [m ²]	18,18	15,38
Pumpleistung Filtration 1 [kWh]	2,70	
Pumpleistung Filtration 2 [kWh]	2,07	
Pumpleistung Filtration 3 [kWh]	2,41	
Summe Pumpleistung [kWh]	7,18	
Summe Pumpleistung [MJ]	25,84	
Summe erzeugte Wärme [MJ]	19,89	

Tabelle Anhang 14: Behältergrößen für die Bereitstellung an Lösungen für vier Batchreinigungen

	Summe der Volumina pro Batch	Nenngröße Behälter für je vier Batch
Lösung I Rohrmodul	1.658 l	7.000 l
Lösung II Rohrmodul	1.105 l	4.500 l

Tabelle Anhang 15: Behälterabmessungen

Bezeichnung	Anzahl	Nennvolumen [l]	Außendurchmesser [mm]	Gesamthöhe [mm]	Wandstärke [mm]
4.500 l Lösung II Rohrmodul	1	4.500	1.800	2.546	10
7.000 l Lösung I Rohrmodul	1	7.000	2.100	3.173	10

Tabelle Anhang 16: CIP-Verbrauch und entstehendes Abwasser bei einem 5 m³ Batch

(Summe techn. Wasser entspricht Wasser zum Vor- und Nachspülen, zweite Hälfte des Nachspülwassers wird zum Vorspülen wiederverwendet. Abwasser = Summe aus Neutralisierter Lauge und techn. Wasser)

Bezeichnung	Anzahl	Reinigung pro Batch	Rezirkulation Lauge [m ³]	Summe techn. Wasser [m ³]	Abwasser [m ³]
4.500 l Lösung II Rohrmodul	1	0,25	0,38	0,62	1,00
7.000 l Lösung I Rohrmodul	1	0,25	0,58	0,70	1,29
Summe Rohrmodul			4,06	5,99	10,06
Summe Rohrmodul mit 10% Rohrleitungszuschlag			4,78	7,19	11,97

Tabelle Anhang 17: Verbrauch an Kühlenergie für SIP und CIP pro 5 m³ Batchvolumen

Bezeichnung	Anzahl	Reinigung pro Batch	Summe Kühlenergie SIP [MJ]	Summe Kühlenergie CIP [MJ]
4.500 l Lösung II Rohrmodul	1	0,25		5,075
7.000 l Lösung I Rohrmodul	1	0,25		7,358
Summe Rohrmodul			47,00	63,55
Summe Rohrmodul mit 10% Rohrleitungszuschlag			51,70	69,91

Tabelle Anhang 18: Stoffmengen und Kühlenergie zur Reinigung des Prozessequipments (Batchvolumen bezogen auf 5 m³)

Substanz	Rohrmodul	Einheit
Dampf (Sterilisierung)*	37,98	kg
Reinigungslösung (0,1 M NaOH)	4,78	m ³
Wasser technisch (Nachspülen)	7,19	m ³
Neutralisationslösung (10 M HCl)	0,0478	l
Kühlenergie	121,6	MJ

*nur für Fermenter

Tabelle Anhang 19: Abwassermengen beim Rohrmodul bei den jeweiligen Prozessschritten bezogen auf 5 m³ Batchvolumen

Abwasser	Rohrmodul	Einheit
Ernte	8.500	l
Filtration 1, 2, 3	12.928	l
Sprühtrocknen	0,25	l
Abwasser nach CIP neutralisiert	11.97	l

Tabelle Anhang 20: Zusammenfassung abzuführender Wärmemengen pro 5 m³ Batchvolumen

Bezeichnung	Wärmemenge [MJ]	Temperatur
$\Delta\dot{Q}_{F1,Rohrmodul}$	-247,6	20 °C → 4°C
$\Delta\dot{Q}_{CIP,Rohrmodul}$	-69,91	80 °C → 20°C

Tabelle Anhang 21: Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen pro 5 m³ Batchvolumen

Bezeichnung	Wärmemenge [MJ]	Temperatur
$\Delta\dot{Q}_{CIP-Lösung,Rohrmodul}$	+680,1	20 °C → 80 °C

Tabelle Anhang 22: Zusammenfassung der elektrischen und der thermischen Energie für ein Batchvolumen von 5 m³

Gesamt	Energie elektrisch: Verbrauch durch Rührwerke, Pumpe und Gerätebetrieb [MJ]	Energie thermisch: Ver- brauch durch Wärme- menge zum Erwärmen von Lösungen [MJ]
Filtration Rohrmodul	46,2	462,5 ^{a)}
SIP/CIP Rohrmodul	4,9	1.173,6/234,7 ^{b)c)}

a) Energie für Lösen Urea in Summe

b) Energie für CIP in Summe

c) Es wird angenommen, dass die Energie, die zum Erwärmen beim SIP/CIP notwendig ist zu 80 % zurückgewonnen werden kann und dadurch nur 20 % der berechneten Kühlenergie für SIP/CIP notwendig sind.

Tabelle Anhang 23: Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen für 5 m³ Batchvolumen

Gesamt	erzeugte Wärme durch Rührwerke und Pumpen [MJ]	berechnete abzuführende Wärmemengen [MJ]	Summe Kühlenergie [MJ]
Filtration Rohrmodul	35,6	310,5 ^{a)}	346,1
SIP/CIP Rohrmodul		121,6/24,3 ^{b)}	121,6/24,3^{b)}

a) Wärmemenge FIRohrmodul, Abkühlen nach Herstellung Urea1

b) Es wird angenommen, dass die Energie, die zum Erwärmen beim SIP/CIP notwendig ist zu 80 % zurückgewonnen werden kann und dadurch nur 20 % der berechneten Kühlenergie für SIP/CIP notwendig sind.

Abschätzung der Menge an Filtermaterial beim Rohrmodul

Abschätzung der Menge an Filtermaterial für einen 5 m³ Batch für die Filtration mit dem Rohrmodul mit dem Filtermaterial Celluloseacetat (wegen fehlendem ecoInvent-Modul war die Betrachtung nicht möglich, stattdessen PVDF berechnet)

Filterfläche 54,55 bzw. 46,15 m²

Standzeit 24 Monate = 24 x 30 Tage x 24 Stunden = 17.280 h

Dauer Filtration 12,9 h

➔ Membran kann 1.339 x eingesetzt werden

➔ Pro 5 m³ Verbrauch an $40,739 \cdot 10^{-3}$ bis $34,466 \cdot 10^{-3}$ m²

➔ Mit 0,1 kg/m² $4,074 \cdot 10^{-3}$ bis $3,445 \cdot 10^{-3}$ kg Celluloseacetat pro 5 m³ Batch

Modul, wenn nur Filtration gerechnet wird:

Tabelle Anhang 24: Bilanzparameter der SIP/CIP Reinigung im Keramik-Modul

SIP/CIP-Reinigung	Reinigungslösung 1 (NaOH)	2,61 m ³	Reinigung Equipment Filtration Keramik	1 unit
	Neutralisationslösung	0,0261 m ³		
Keramik-Modul	Wasser techn.	4,55 m ³	Abwasser Prozess neutral.	7,16 m ³
	Energie, elektrisch	2,6 MJ		
	Energie, thermisch	128,1 MJ		
	Kühlenergie	11,5 MJ		

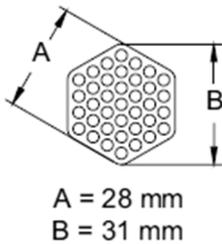
Tabelle Anhang 25: Bilanzparameter der SIP/CIP Reinigung im Rohrmodul

SIP/CIP-Reinigung	Reinigungslösung 1 (NaOH)	2,12 m ³	Reinigung Equipment Filtration Rohrmodul	1 unit
	Neutralisationslösung	0,0212 m ³		
Rohrmodul	Wasser techn.	4,00 m ³	Abwasser Prozess neutral.	6,51 m ³
	Energie, elektrisch	2,6 MJ		
	Energie, thermisch	104,0 MJ		
	Kühlenergie	10,2 MJ		

Anhang N Abschätzung der Dichte des Keramikfilters

Filtertyp EP 3730

EP3730

**Membralox ceramic membranes**

Element type	EP3730
Channel diameter (mm)	3
Number of channels	37
Filtration surface area (m ²)	0.35
Length (mm)	1020

$$A_{\text{Sechseck}} = r^2 \cdot \frac{3}{2} \sqrt{3} = \left(\frac{31\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \frac{3}{2} \sqrt{3} = 624,2 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Kanäle}} = r^2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Kanäle}} = \left(\frac{3\text{mm}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot 37 = 251,5 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{Filter}} = A_{\text{Sechseck}} - A_{\text{Kanäle}} = 362,7 \text{ mm}^2 = 3,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_{\text{Filter}} = A_{\text{Filter}} \cdot L_{\text{Filter}} = 3,63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 1,02 \text{ m} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_{\text{Zirkonium}} \approx 6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$\epsilon_{\text{Keramikfilter}} \approx 50 \% \text{ (aus Patent US 4069157 A, Dupont, 1975 F.W. Hoover, R.E. Roberts)}$$

$$m_{\text{Keramikfilter}} = V_{\text{Filter}} \cdot \rho_{\text{Zirkonium}} \cdot \epsilon_{\text{Keramikfilter}} = 3,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot 6.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,5 = 1,11 \text{ kg}$$

$$U_{\text{Kanäle}} = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot n_{\text{Kanäle}} = 2 \cdot \frac{3\text{mm}}{2} \cdot \pi \cdot 37 = 348,7 \text{ mm} = 0,349 \text{ m}$$

$$A_{\text{Kanäle}} = U_{\text{Kanäle}} \cdot L_{\text{Kanäle}} = 0,349 \text{ m} \cdot 1,02 \text{ m} = 0,356 \text{ m}^2$$

$$\rho_{\text{Keramikfilter}} = \frac{m_{\text{Keramikfilter}}}{A_{\text{Kanäle}}} = \frac{1,11\text{kg}}{0,356 \text{ m}^2} = 3,12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Anhang O Sterilfilter für Glucose

Für Glucose muss eine Sterilfiltration eingeplant werden. Es wird eine einfache, zweistufige Filtration mit einem 5 µm Vorfilter und einem 0,2 µm Sterilfilter vorgesehen^{73S 688/689}.

Der notwendige Volumenstrom berechnet sich durch den Verdünnungsfaktor der Vorlagekonzentration im Fermenter, dem Anfangsvolumen der Batchfermentation und der Zeitspanne, in der das Volumen an Glucoselösung in den Fermenter gefüllt werden soll:

$$\dot{V}_{\text{Zulauf}} = \frac{\frac{c_{\text{Fermenter}}}{c_{\text{Vorlage}}} \cdot V_{\text{Batch}}}{t_{\text{Zulauf}}} = \frac{\frac{17,6 \frac{\text{g}}{\text{l}}}{410 \frac{\text{g}}{\text{l}}} \cdot 63.000 \text{ l}}{2,0 \text{ h}} = 1.352 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

$$\frac{c_{\text{Fermenter}}}{c_{\text{Vorlage}}}$$

Verdünnungsfaktor der Vorlagekonzentration im Fermenter

$$V_{\text{Batch}}$$

Anfangsvolumen der Batchfermentation

$$t_{\text{Zulauf}}$$

Zeitspanne für den Zulauf

Es ergibt sich ein minimaler Volumenstrom des Zulaufs von 1.352 l/h. Es soll mit 1.500 l/h weiter gerechnet werden. Daraus berechnet sich die Filtergröße mit einer Filtrationsrate im Vorfilter von $500 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ und im Sterilfilter von $200 \frac{l}{m^2 \cdot h}$ nach^{73S 688} nach:

$$A_{F1051} = \frac{\dot{V}_{Zulauf}}{\dot{m}_{F1}} = \frac{1.500 \frac{l}{h}}{500 \frac{l}{m^2 \cdot h}} = 3 m^2$$

$$A_{F1052} = \frac{\dot{V}_{Zulauf}}{\dot{m}_{F2}} = \frac{1.500 \frac{l}{h}}{200 \frac{l}{m^2 \cdot h}} = 7,5 m^2$$

Für den 5 µm Vorfilter ergibt sich eine Filterfläche von 3 m² und für den 0,2 µm Sterilfilter von 7,5 m².

Anhang P Berechnung Harnstoffkonzentration der Abwasserfraktion

$$c_{\text{Harnstoff im Abwasser}} = \frac{8 M \cdot (572 l + 2004 l + 750 l) + \frac{8 M + 0,29 M}{2} \cdot 826 l}{4152 l} = 6,27 M$$

Der Harnstoffgehalt des Abwassers nach Abtrennen der harnstoffhaltigen Fraktion bei der Filtration kann wie folgt berechnet werden:

Mit einem Diafiltrationsfaktor $D = \frac{V_{\text{Diafiltrations}}}{V_{\text{Konzentratvolumen}}} = \frac{826 l}{250 l} = 3,3$ berechnet sich die Konzentration an Harnstoff im Abwasser nach Diafiltration mit 826 l technischen Wasser mit einem Rückhalt an Harnstoff von 0% und einer Ausgangskonzentration von 8 M zu $c_{\text{Retentat}} = c_0 \cdot e^{(D \cdot (R-1))} = 8 \frac{\text{mol}}{l} \cdot e^{(3,304 \cdot (0-1))} = 0,29 \frac{\text{mol}}{l}$.

Mit dem restlichen Diafiltrationsvolumen von 1.652 l wird mit einem Diafiltrationsfaktor von 6,6 die Konzentration von 0,29 mol/l auf 0,00039 mol/l reduziert. Es ergibt sich damit eine Menge von 28,7 kg Harnstoff, der im Abwasser verbleibt $\left((0,29 \frac{\text{mol}}{l} - 0,00039 \frac{\text{mol}}{l}) \cdot 1.652 l \cdot 60,06 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 28,7 \text{ kg} \right)$. Es wird mit der Vereinfachung modelliert, dass 726,8 kg Harnstoff (755,5 kg - 28,7 kg) in gleicher Qualität wie der ursprüngliche Rohstoff zurückgeführt wird. Dies entspricht einem Verlust von 3,7% an Harnstoff.

Anhang Q Berechnung zur Abwasserbehandlung der Ernte und Filtration

Die Berechnung der Zusammensetzung über die Strukturformel von Spinnenseide (Strukturformel über Gensequenz berechnet mit protparam (<http://web.expasy.org/protparam/>), Gensequenz zur Verfügung gestellt von Lukas Eisoldt). Das Spinnenseidenprotein eADF4(C₁₆) besitzt eine Summenformel C₂₀₁₁H₄₀₆₉N₅₉₇O₁₃₁₉S₄.

Tabelle Anhang 26: Berechnung der Summenformel von Spinnenseide

Aminosäure	Mol- masse [g/mol]	Summen- formel	Spinnen- seiden- protein	Elementarzusammensetzung Spinnenseidenprotein eADF4(C16)				
				C	H	N	O	S
Alanin	89,1	C ₃ H ₇ NO ₂	129	387	903	129	258	0
Arginin	174,2	C ₆ H ₁₄ N ₄ O ₂	1	6	14	4	2	0
Asparagin	133,1	C ₄ H ₇ NO ₄	16	64	112	16	64	0
Glutamin	146,2	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₃	18	90	180	36	72	0
Glutaminsäure	147,2	C ₅ H ₉ NO ₄	16	80	144	16	32	0
Glycin	75,1	C ₂ H ₅ NO ₂	197	394	985	197	394	0
Methionin	149,2	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	4	20	44	4	8	4
Prolin	115,1	C ₅ H ₉ NO ₂	96	480	864	96	192	0
Serin	87,0	C ₃ H ₇ NO ₃	66	198	462	66	198	0
Threonin	119,1	C ₄ H ₉ NO ₃	1	4	9	1	3	0
Tryptophan	204,2	C ₁₁ H ₁₂ N ₂ O ₂	0	0	0	0	0	0
Tyrosin	181,2	C ₉ H ₁₁ NO ₃	32	288	352	32	96	0
Summe				2.011	4.069	597	1.319	4

Alle Inputstoffe können basierend auf der Zusammensetzung des Fermentationsmediums, der Lösungen und der weiteren Hilfsstoffe berechnet werden. Die Mengen der Input Stoffe sind in Tabelle Anhang 27 und die Mengen der Output Stoffe Tabelle Anhang 28 aufgeführt. Die Zusammensetzung des Abwassers der Ernte und der Filtration (ohne harnstoffhaltige Fraktion) wird bilanziert, indem die Bestandteile aufsummiert (Spalte Gesamtmenge in Tabelle Anhang 27 und 28) dann auf das gesamte Abwasservolumen bezogen werden (Spalte Menge pro Liter in Tabelle Anhang 27 und 28). Das Gesamte Abwasservolumen berechnet sich durch die Volumina von Fermentation, Ernte und Filtration abzüglich des Volumens, in dem die Spinnenseiden nach der Filtration verbleibt (Tabelle Anhang 29). Die Berechnung wurde für einen Fermentationslauf von 100.000 l berechnet.

Tabelle Anhang 27: Input Stoffe für die Berechnung der Zusammensetzung „Abwasser nach Filtration und Ernte“: Massenanteile und Menge pro Liter

Materialien Input	Summenformel	Molare Masse [g/mol]	Gesamt- menge [kg]	Menge pro Liter [kg/l]
Glucose	C ₆ H ₁₂ O ₆	180,16	4.126,3	2,54E-02
Sauerstoff	O ₂	31,98	7.661,3	1,57E-02
Kaliumdihydrogenphosphat	KH ₂ PO ₄	115,03	837,9	1,85E-03
Diammoniumhydrogenphosphat	(NH ₄) ₂ HPO ₄	132,05	252	5,56E-04
Zitronensäure	C ₆ H ₈ O ₇	192,13	107,1	2,36E-04
Magnesiumsulfat	MgSO ₄ *7H ₂ O	246,47	2.100,5	4,63E-03
Kanamycin	C ₁₈ H ₃₈ N ₄ O ₁₅ S	582,58	2,2	4,85E-06
Ammoniak	NH ₃	17,00	725,9	1,60E-03
EDTA	C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈	292,24	1,32	2,90E-06
CoCl ₂ * 6H ₂ O	CoCl ₂ * 6H ₂ O	207,01	0,40	8,93E-07
MnCl ₂ * 4H ₂ O	MnCl ₂ * 4H ₂ O	197,90	2,33	5,13E-06
CuCl ₂ * 2H ₂ O	CuCl ₂ * 2H ₂ O	170,48	0,25	5,58E-07
H ₃ BO ₃	H ₃ BO ₃	61,83	0,51	1,12E-06
Na ₂ MoO ₄ * 2H ₂ O	Na ₂ MoO ₄ * 2H ₂ O	205,92	0,40	8,93E-07
Zn(CH ₃ COO) ₂ * 2H ₂ O	Zn(CH ₃ COO) ₂ *2H ₂ O	219,52	1,62	3,57E-06
Fe (III) citrat * 2H ₂ O	C ₆ H ₅ FeO ₇ (H ₂ O) ₂	280,68	4,05	8,93E-06

Lösen der Zelltrümmer + Neutr.	NaOH + HCl	76,43	191,1	4,21E-04
Tris (Puffer)	C ₄ H ₁₁ NO ₃	121,14	364,1	8,03E-04
HCl (zum pH-Wert einstellen)	HCl	36,46	73,0	1,61E-04
NaCl (Puffer)	NaCl	58,44	351,3	7,75E-04
Harnstoff	CH ₄ N ₂ O	60,06	28,7	6,33E-05

Tabelle Anhang 28: Output Stoffe für die Berechnung der Zusammensetzung „Abwasser nach Filtration und Ernte“: Massenanteile und Menge pro Liter

Materialien Input	Summenformel	Molare Masse [g/mol]	Gesamtmenge [kg]	Menge pro Liter [kg/l]
Kohlendioxid durch Stoffwechsel	CO ₂	44,01	9.790,0	2,16E-02
Wasser durch Stoffwechsel	H ₂ O	18,00	4.004,1	8,83E-03
Wasser in Lösung nach Filtration	H ₂ O	18,00	4.494,0	9,91E-03
Spinnenseidenprotein eADF(C16)	C ₂₀₁₁ H ₄₀₉₆ N ₅₉₇ O ₁₃₁₉ S ₄	56.878,82	506,0	1,12E-03

Tabelle Anhang 29: Massenanteile für die Berechnung „Abwasser nach Filtration und Ernte“

Massenanteile des Abwassers	Menge in kg
Input Volumen Fermentation	101.205
Input Volumen Ernte	140.000
Input Volumen Filtration (ohne Urea)	206.980
Input Volumen Summe	448.185
davon Feststoff (Glucose, Medienbestandteile, Lösung, Hilfsstoffe)	9.169
davon Wasser aus Rohstoffen	1.077
Output Volumen Filtration	5.000
davon Feststoff (Spinnenseide)	506
Gesamtmenge Abwasser	443.185
davon Feststoff	7.586

Da die Zusammensetzung des ecoInvent-Moduls mit ppm pro kg angegeben ist, wurde die Zusammensetzung des Abwassers auf diese Einheit umgerechnet. Dazu wurde die Masse aller Feststoffbestandteile aufsummiert und von der Gesamtmasse des Abwassers abgezogen (Annahme 1 l Abwasser hat eine Dichte von 1 kg/l). Der verbleibende Teil des Abwassers wurde mit 1.000.000 multipliziert um die Normierung auf „ppm pro kg“ zu erreichen. Dann wurden für jede verwendete Substanz die Atome der Summenformel gezählt und mit der Atommasse im Bezug zur Molekülmasse das anteilige Gewicht der Atomspezies von der Gesamtmasse des Moleküls berechnet. Diese Masse wurde auf das Gesamtvolumen des Abwassers bezogen und ebenfalls mit 1.000.000 multipliziert.

$$\frac{M_{\text{Atom}}}{M_{\text{Molekül}}} \cdot Z_{\text{Atome im Molekül}} \cdot m_{\text{Molekül}} \cdot 1.000.000 \\ V_{\text{Abwasser Ernte und Filtration}}$$

Es ergibt sich für das Abwasser der Ernte und Filtration ein Wasseranteil von 982.883 ppm pro kg, der für die Verwendung des EcoInvent-Moduls auf 600.000 ppm pro kg reduziert werden muss. Es müssen 97,5% des Wassers vom Abwasservolumen abgeführt werden. In der Aufsummierung der Anteile des Abwassers liegt ein vernachlässigbar kleiner Fehler von

0,06% vor, der auf die Vereinfachung zurückgeführt wird, dass das Abwasser eine Dichte von 1 kg/cm^3 besitzt.

Es wird für die Modellierung davon ausgegangen, dass zunächst das Abwasser der Ernte und der Filtration zusammengeführt wird und nach einer Abtrennung der Wasserfraktion eine anschließende Verbrennung der verbleibenden Bestandteile angenommen werden kann. Dafür kann das Modul „Entsorgung, Bioabfall, 60% H₂O, in Kehrrechtverbrennung, Allokation Preis“ verwendet werden. Es liegen unterschiedliche Verhältnisse der Zusammensetzung des ecoInvent-Moduls und des Abfalls der Herstellung der Spinnenseide vor. Bei der Spinnenseide sind vor allem mehr Schwefel und Phosphor enthalten, jedoch weniger Schwermetalle. Für die Modellierung wurde dieser Unterschied nicht berücksichtigt.

Tabelle Anhang 30: Zusammensetzung „Abwasser nach Ernte und Filtration“, dem EcoInvent-Modul „Entsorgung Bioabfall“, und der Neuberechneten Zusammensetzung „Abwasser nach Ernte und Filtration“

Substanz	Abwasser nach Ernte und Filtration [ppm pro kg]	Modul Entsorgung Bioabfall [ppm pro kg]	Abwasser nach Ernte und Filtration [ppm pro kg]
H ₂ O	982.883	600.000	600.000
O	7.676	126.430	186.042
H	1.088	20.000	26.363
C	3.670	162.400	88.940
S	613	1.499,3	14.859
N	1.316	4.000	31.890
P	643	1.130	15.585
B	0	10,24	5
Cl	237	4.000	5.736
Br	0	6	0
F	0	200	0
I	0	0,055	0
As	0	2	0
Cd	0	0,138	0
Co	0,26	5	6
Cr	0	8	0
Cu	0,21	18	5
Hg	0	0,07	0
Mn	1	4,3	35
Mo	0	0,4	10
Ni	0	5,42	0
Pb	0	18,56	0
Se	0	0,49976	0
Sn	0	7,9961	0
V	0	2,9985	0
Zn	2	58,24	44
Si	0	39,980	0
Fe	1	600	26
Ca	0	21.800	0
Al	0	9.995,10	0
K	641	3.500	15.536
Mg	467	2.820	11.326
Na	148	1.500	3.591
Summe	999.387	1.000.002	1.000.000
Feststoffanteil	16.504	400.002	400.000

Anhang R Berechnung weiterer Wärmemengen im Prozess

Berechnungen nach Formel 27, Kapitel 3.3.9

1. Fermentation

Annahme bei der Berechnung¹³¹: Wärmekapazität $c_p = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K}$ und Dichte $\rho = 1.050 \frac{kg}{m^3}$

Erwärmung des Fermentationsmediums von 20 auf 37 °C

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Batch-Lösungen}} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.050 \frac{kg}{m^3} \cdot 63,0 m^3 \cdot (+17 K)$$

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Batch-Lösungen}} = + 4.475,7 MJ \text{ (223,8 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

Zugabe von Medium während der Fermentation

Medium mit 20 °C zu Fermentation bei 37 °C

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Fedbatch-Lösungen}} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.050 \frac{kg}{m^3} \cdot 8,84 m^3 \cdot (+17 K)$$

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Fedbatch-Lösungen}} = + 613,8 MJ \text{ (+30,7 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

Medium mit 20 °C zu Fermentation bei 25 °C

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Induktion-Lösungen}} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.050 \frac{kg}{m^3} \cdot 29,765 m^3 \cdot (+5 K)$$

$$\Delta Q_{\text{Erwärmung Induktion-Lösungen}} = + 621,9 MJ \text{ (+31,1 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

Durch Zugabe von kaltem Medium muss weniger Wärme bei der Fermentation abgeführt werden. Die Wärmemenge zum Erwärmen des Mediums wird jeweils von der Wärmemenge, die bei der Fermentation abgeführt werden muss, abgezogen.

Temperaturabsenkung von 37 auf 25 °C für Produktbildung

Abkühlen des Hauptfermenters von Fedbatch- zu Induktionsphase von 37 auf 25 °C

$$\Delta Q_{\text{Abkühlen Ferm.-lösungen}} = c_{p,\text{Ferm.-brühe}} \cdot m \cdot \Delta T = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.050 \frac{kg}{m^3} \cdot 71,44 m^3 \cdot (-12 K)$$

$$\Delta Q_{\text{Abkühlen Ferm.-lösungen}} = -3.582,7 MJ \text{ (-179,1 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

Wärmeentwicklung bei der Fermentation (siehe 5.1.1.2)

$$\Delta Q_{\text{Vorermenter1,2,3}} = -87,25 MJ \text{ (-4,4 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

$$\Delta Q_{\text{Hauptfermenter}} = - 102.343 MJ - \Delta \dot{Q}_{\text{Erwärmung Fedbatch\&Induktion-Lösungen}} = -101.107 MJ$$

(ohne 5117,1 MJ ohne Vorerwärmung bei 5.000 l Batchvolumen, 5055,3 MJ mit)

Wärmabfuhr am Ende der Fermentation von 25 auf 4 °C

$$\Delta Q_{\text{Abkühlung nach Fermentation}} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 3,98 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.050 \frac{kg}{m^3} \cdot 101,205 m^3 \cdot (-21 K)$$

$$\Delta Q_{\text{Abkühlung nach Fermentation}} = -8.881,6 MJ \text{ (444,1 MJ bezogen auf 5.000 l Batchvolumen)}$$

2. Ernte

Abführen der Wärme von 7.000 l techn. Wasser zum Waschen der Zellen von 20 auf 4 °C

$$\Delta Q_{Puffer\ Ernte} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 4,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot 7,0 m^3 \cdot (-16 K) = -448,0 MJ$$

3. FiltrationFiltration 1

Abführen der Wärme von 7.015 l techn. Wasser zum Waschen des unlöslichen Proteins und Zellbruchtücken nach dem Zellaufschluss von 20 auf 4 °C

$$\Delta Q_{F1,Keramik} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 4,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot 7,015 m^3 \cdot (-16 K) = -449,0 MJ$$

$$\Delta Q_{F1,Rohrmodul} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 4,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.000 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,868 m^3 \cdot (-16 K) = -247,6 MJ$$

Zugabe von 10 M NaOH und Verdünnung auf 0,5 M NaOH führt zu keinem nennenswerten Temperaturanstieg^{155S35}.

Filtration 2

Arbeiten bei Umgebungstemperatur, zum Lösen von Harnstoff sollte die Lösung 30 °C haben. Abführen der Kälte von 2.572,5 l Produktlösung (weitere Verarbeitung bei Raumtemperatur) 4 auf 30 °C

$$\Delta Q_{F2,Temperieren\ auf\ RT} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 4,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 2.572,5 kg \cdot (+26 K) = +267,5 MJ$$

Zuführen von Wärme zum Lösen von Harnstoff, Endkonzentration von 8 M Endvolumen
Lösen von Urea¹³² in Produktlösung mit finaler Konzentration von 8 M

$$\Delta H_{sol}(Urea) = 15,5 \frac{kJ}{mol}$$

$$V_{End} = V_{Lösung} + V_{Urea} = V_{Lösung} + \frac{V_{End} \cdot M(Urea) \cdot c(Urea)}{\rho_{Urea}} = 1.572,34 l$$

$$m_{Urea} = 755,5 kg$$

$$\Delta Q_{F2,Lösen\ Urea1} = \Delta H_{sol}(Urea) \cdot c \cdot V_{End} = +15,5 \frac{kJ}{mol} \cdot 8 \frac{mol}{l} \cdot 1.572,34 l = +195,0 MJ$$

Nach Lösen des Harnstoffs absenken der Arbeitstemperatur von 30 auf 20 °C

$$\Delta Q_{Abkühlen\ nach\ Lösungsherstellung} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = 4,0 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot 1.572 kg \cdot (+10 K) = -62,9 MJ$$

Filtration 3

Zuführen von Wärme zum Lösen von Harnstoff zum Waschen des Proteins. Zum Lösen von 8 M Harnstoff in 1000 l techn. Wasser werden benötigt:

$$\Delta Q_{F3,Lösen\ Urea2} = \Delta H_{sol}(Urea) \cdot c \cdot V_{End} = \Delta Q_{F3a}$$

$$\Delta Q_{F3,Lösen\ Urea2} = +15,5 \frac{kJ}{mol} \cdot 8 \frac{mol}{l} \cdot 1.000 l = 124 MJ$$

4. Bereitstellung von Prozessmedien

10 M NaOH für Produktion

12,5 l für Prozess + 45,6 l für Behälter- und Gerätereinigung = 60 l 10 M NaOH Lösung (max. 4,56 m³ 0,1 M NaOH für CIP).

$$\Delta H_L = -44,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$$

$$\Delta Q_{10 \text{ M NaOH-Lösung}} = \Delta H_L \cdot n \cdot V$$

$$\Delta Q_{10 \text{ M NaOH-Lösung}} = -44,5 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 10 \frac{\text{mol}}{\text{l}} \cdot 60 \text{ l}$$

$$\Delta Q_{10 \text{ M NaOH-Lösung}} = -26,7 \text{ MJ}$$

Theoretische Temperaturerhöhung beim Lösen von NaOH

$$c_{p,10 \text{ M NaOH}} = 3,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad 156$$

$$\rho_{10 \text{ M NaOH}} = 1,41 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad 156$$

$$\Delta T = \frac{\Delta Q_{10 \text{ M NaOH-Lösung}}}{c_{p,NaOH} \cdot \rho_{10 \text{ M NaOH}} \cdot V} = \frac{-33.375 \text{ kJ}}{3,47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,41 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 60 \text{ l} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}}} = 113,4 \text{ K}$$

Kühlung während Herstellung der Lösung notwendig.

Reinigungslösung 0,1 M NaOH (0,4%-ige Lösungen)

- Wärmekapazität werden additiv gerechnet
- Kristallines NaOH $c_{NaOH,c} = 1,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- Dichte der verdünnten Lösung wie von Wasser $\rho_W = 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$c_{0,1 \text{ M NaOH}} = c_{W,fl} \cdot m_W \% + c_{NaOH,c} \cdot m_{NaOH} \%$$

$$c_{0,1 \text{ M NaOH}} = \left\{ 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \frac{0,96 \text{ g}}{\text{kg}} + 1,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \frac{0,04 \text{ g}}{\text{kg}} \right\} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta Q_{CIP-Lösung} = c_{0,1 \text{ M NaOH}} \cdot m_{0,1 \text{ M NaOH}} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

$$\Delta Q_{CIP-Lösung} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (80 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \cdot m_{\text{Gesamt}}$$

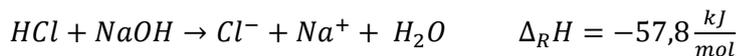
$$\Delta Q_{CIP-Lösung,100.000 \text{ l}} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 60 \text{ K} \cdot 40,2 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = +9.869,9 \text{ MJ}$$

$$\Delta Q_{CIP-Lösung,5.000 \text{ l}} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 60 \text{ K} \cdot 2,01 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = +493,5 \text{ MJ}$$

$$\Delta Q_{CIP-Lösung,Keramik} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 60 \text{ K} \cdot 3,31 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = +812,6 \text{ MJ}$$

$$\Delta Q_{CIP-Lösung,Rohrmodul} = 4,092 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 60 \text{ K} \cdot 2,77 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = +680,1 \text{ MJ}$$

Beim Prozess mit Keramik-Modul werden 102,8 MJ, mit Rohrmodul 97,3 MJ an Energie beim Abkühlen der Behälter nach SIP/CIP abgeführt, die zum Erwärmen der Lösungen verwendet werden kann. Diese Menge an Energie wird mit dem Verlust der Peripherie verrechnet.

Neutralisationsenthalpie¹³³

$$V(0,1 \text{ M NaOH}) = 4,56 \text{ m}^3$$

$$n(\text{NaOH}) = \frac{m}{M} = \frac{4,56 \cdot 10^3 \text{ l} \cdot 0,1 \text{ l}}{39,99 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 11,4 \text{ mol}$$

$$\Delta Q_{\text{Neutralisation}} = \Delta_R H \cdot n = -57,8 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \cdot 11,4 \text{ mol} = -0,7 \text{ MJ}$$

Die bei der Neutralisation entstehende Wärme ist vernachlässigbar.

Wechselseitige Verdünnung von NaOH und HCl

Vorlage 0,1 M NaOH und äquimolare Menge an 10 HCl: Verdünnungswärme beim Verdünnen von NaOH ist vernachlässigbar, da nur ein geringes Volumen an HCl zugegeben wird. Die Verdünnungswärme beim Verdünnen von 36,46% HCl auf 0,3646% entspricht -472 kJ/kg (210 BTU/# - 7 BTU/# = 203 BTU/# * 2,324 kJ/kg/(BTU/#) = 472 kJ/kg^{157 S 31})

$$\rho(\text{HCl}) = 1,19 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m(\text{HCl}) = 0,00456 \text{ m}^3 \cdot 1,19 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 37\% = 2,0 \text{ kg}$$

$$\Delta Q_{\text{HCl-Verdünnung}} = -472 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 2,0 \text{ kg} = -944 \text{ kJ} = -0,9 \text{ MJ}$$

Die beim Verdünnen von 36,46% auf 0,3646% HCl entstehende Wärme ist vernachlässigbar.

Dampf

Die notwendige Energie zum Erzeugen von Dampf wird über das ecoInvent-Modul „Dampf für chemische Prozesse“ berücksichtigt.

5. Berechnung der Kühlenergie bei SIP/CIP

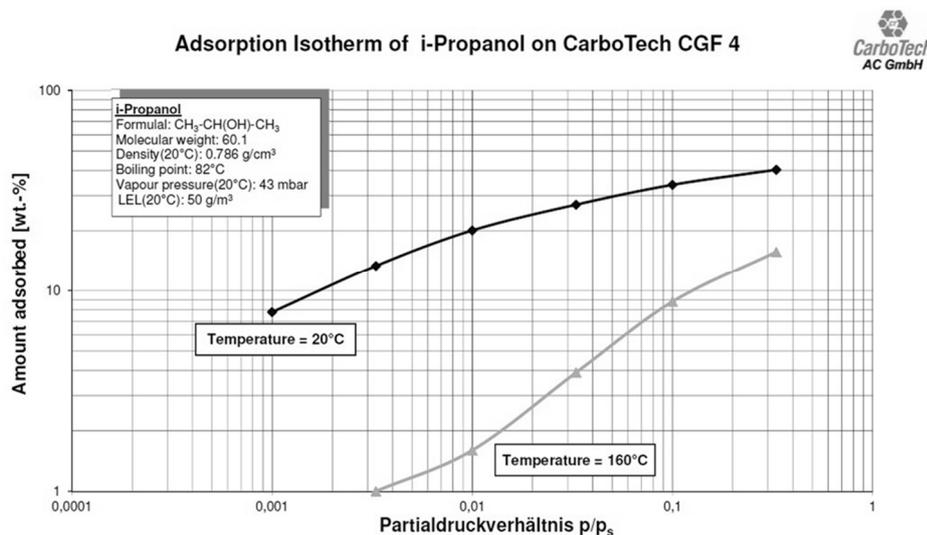
Der Wärmestrom an Kühlenergie, der nach dem SIP/CIP notwendig ist, um die Behälter wieder auf Raumtemperatur abzukühlen, berechnet sich aus dem Behältergewicht, der dazugehörigen Wärmekapazität für Stahl, der zu überwindenden Temperaturdifferenz und dem Zeitintervall in dem die Kühlung erreicht werden soll⁹¹. Es wird ein Verlust von 5% eingerechnet.

$$\Delta \dot{Q} = \frac{m_{\text{Behälter}} \cdot c_{\text{Stahl}} \cdot \Delta T}{t_{\text{Abkühlen}}} \cdot (1 + \text{Verlust})$$

$\Delta \dot{Q}$	notwendiger Wärmestrom zum Abkühlen eines Behälters in kJ
$m_{\text{Behälter}}$	Gewicht des Behälters inkl. Rührwerk (berechnet über Behältergeom.)
c_{Stahl}	Wärmekapazität Stahl 450 kJ/(kg*K)
ΔT	Temperaturdifferenz (125°C-90°C für SIP, 80°C-20°C für CIP)
$t_{\text{Abkühlen}}$	Abkühlzeitspanne (30 min für SIP, 60 min für CIP)
Verlust	5% Verlust an Kühlleistung

$$\Delta \dot{Q}_{\text{SIP}} = \Delta \dot{Q} \cdot 30 \text{ min}$$

$$\Delta \dot{Q}_{\text{CIP}} = \Delta \dot{Q} \cdot 60 \text{ min}$$

Anhang S Adsorptionsisotherme von Isopropanol an AktivkohleAnhang T Unsicherheiten von ecoInvent Datensätzen

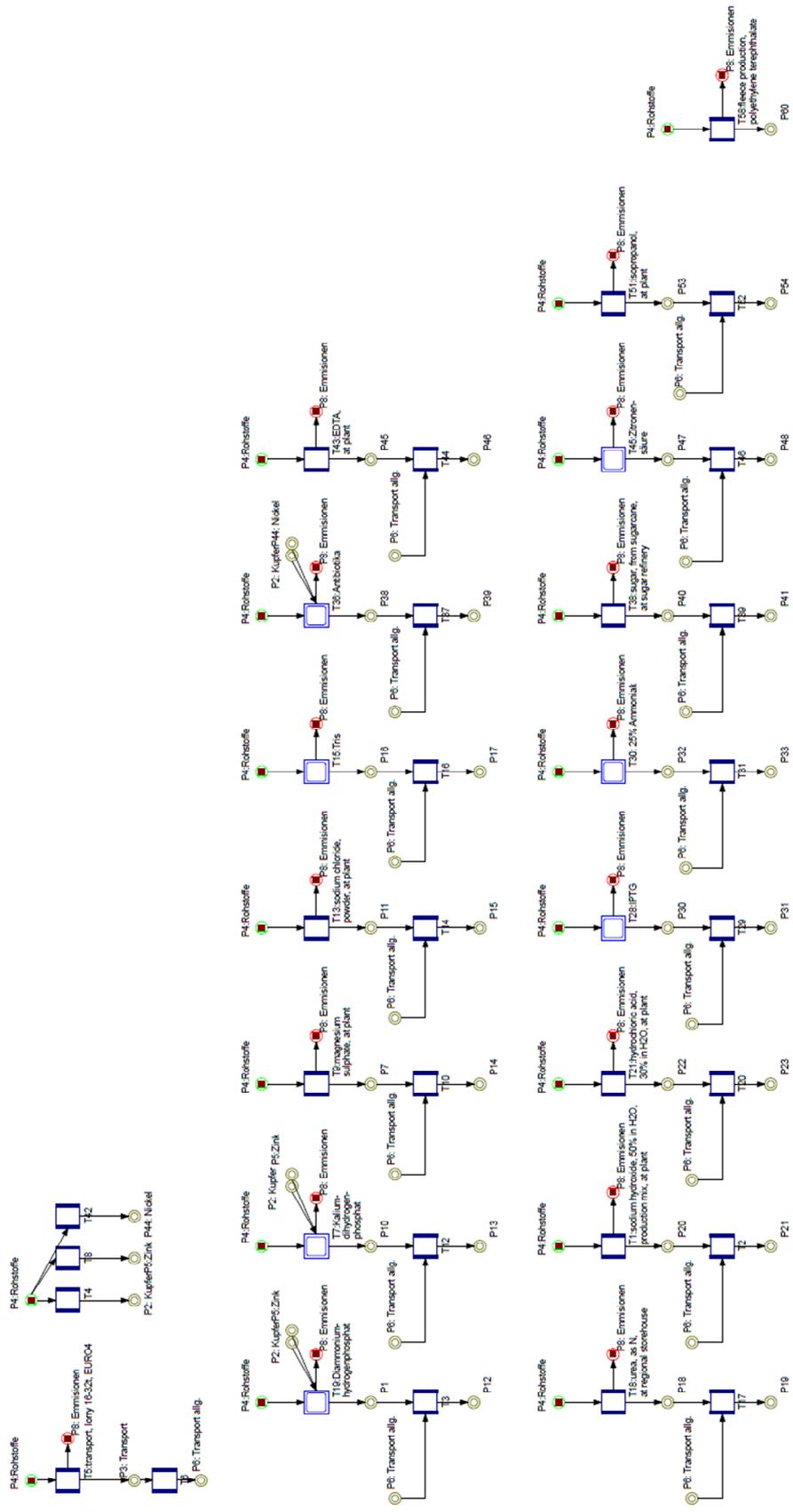
In der Sachbilanz eines Datensatzes sind die jeweiligen In- und Outputströme mit ihren Werten angegeben. Diese quantitative Beschreibung beinhaltet Unsicherheiten, da die hinterlegten Werte, die recherchiert, gemessen oder berichtet wurden vom „waren“ Wert abweichen können^{158 Kap7}. Es gibt unterschiedliche Arten von Unsicherheiten in den Sachbilanzen von ecoInvent-Datensätzen, die zur Vereinfachung ihrer Beschreibung und Dokumentation in sechs Punkte unterteilt wurden:

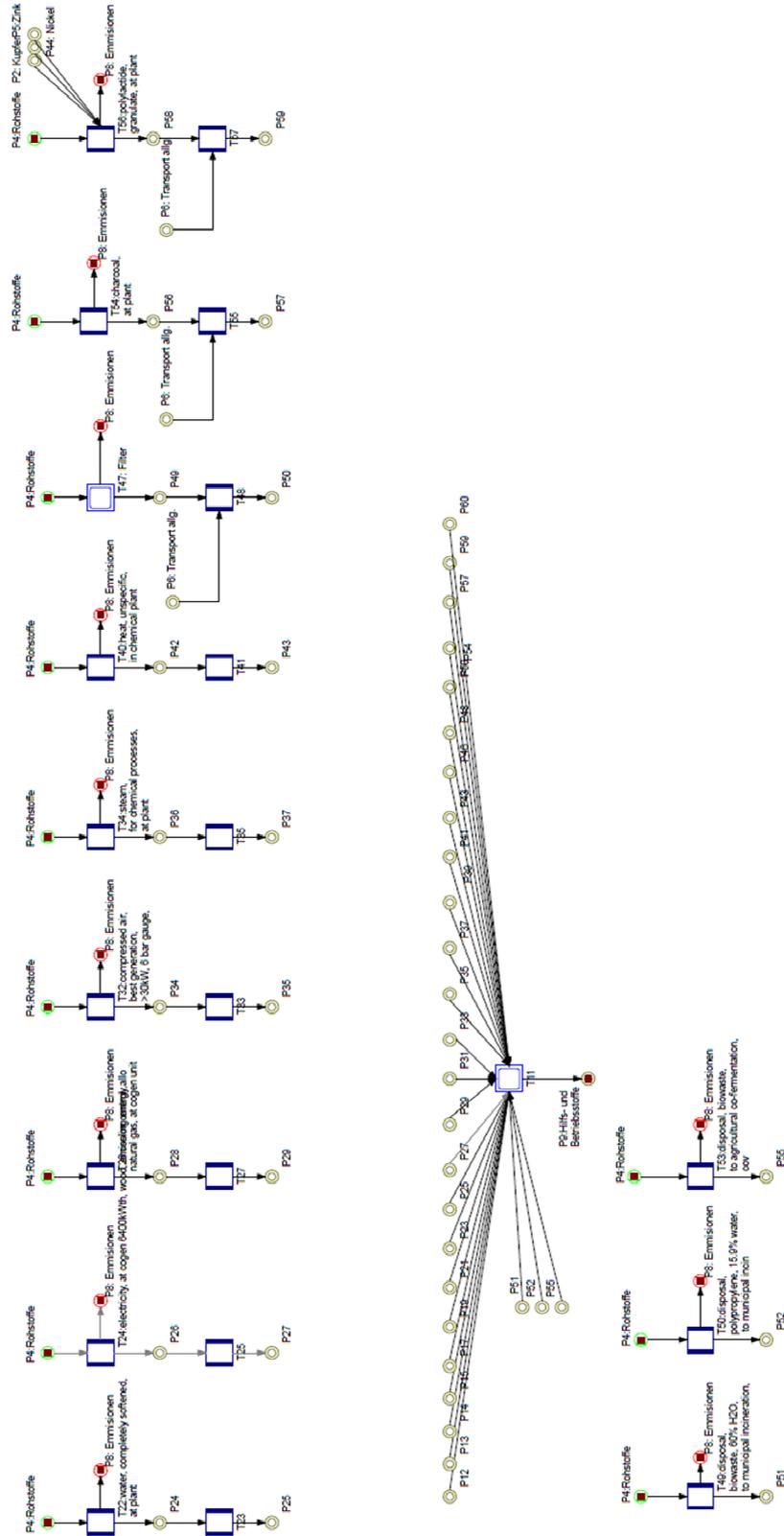
- Zuverlässigkeit
- Vollständigkeit
- Zeitlicher Bezug
- Geographischer Bezug
- Technischer Bezug
- Probengröße

Trotz dieser Möglichkeit der Erfassung von Unsicherheiten gibt es Weitere, die nicht mit dieser Methode quantifiziert werden können und die dadurch die Aussagefähigkeit von Ökobilanzen beeinflussen können. Diese können sein:

- Fehlende Informationen in den Sachbilanzen
- Unangemessene Modellierung der Input- und Outputströme
- Durch menschliches Versagen verursachte Fehler

Anhang U Abbildung des Moduls der Vorketten





Anhang V Verwendete Datenmodule von Umberto und ecoInvent, sowie Sachbilanz-Datenherkunft

In der folgenden tabellarischen Aufstellung sind alle verwendeten Datenmodule für Rohstoffe und (Teil-)Prozesse aufgeführt. Es sind Angaben zur Repräsentativität, sowie eine Kurzbeschreibung inklusive getroffener Annahmen, einbezogenen Vorketten und Transporte aufgeführt. Soweit vorhanden ist auch eine Angabe zur Datenqualität aufgeführt. Ausführliche Modulbeschreibungen können in den angegebenen Literaturquellen nachgelesen werden.

1. Teilsystem Herstellung der Hilfs- und Betriebsstoffe

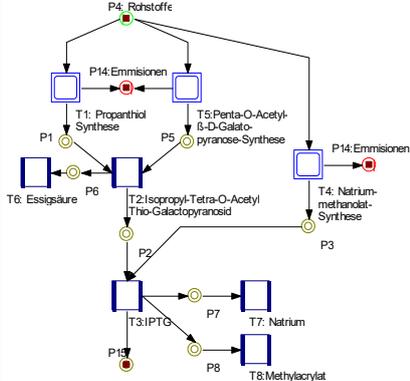
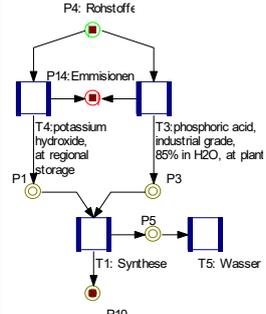
Die Datensätze der Hilfs- und Betriebsstoffe sind in folgende Kategorien unterteilt:

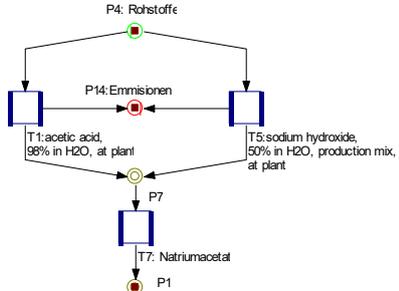
- 1 direkte verwendeter Datensatz
- 1' direkter Datensatz, der auch verwendet werden könnte
- 2 Datensatz zur Erzeugung andere Datensätze
- CS Datensatz über chem. Synthese erzeugt
- ES Ersatz, weil kein anderen Datensatz vorhanden

Kategorie	Modul/ Stoff	Datenherkunft Literaturquellen	Bezugsjahr, geographischer Bezug	Kurzbeschreibung, Annahmen, Vorketten, Transporte	Datenqualität / Anmerkungen	CO ₂ - eq/kg 100a (CML 2001)	anderer Datensatz vorhanden
2	Ammoniak / ammonia, liquid, at regional storehouse	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.1 Althaus H.-J. Chudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	2000- 2012, RER	Average of numbers for steam reforming (85%) and partial oxidation of heavy fuel oil (15%). Steam reforming: Manufacturing process starting with natural gas, air and electricity is considered, plus auxiliaries, energy, transportation, infrastructure and land use, as well as wastes and emissions into air and water. Transport of the raw materials, auxiliaries and wastes is included, transport and storage of the product are not included. Carbon Dioxide is the byproduct generated. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Values are taken principally from EFMA 2000 and Frischknecht 1999 (see report). Inventory refers to 1 kg 100% ammonia, liquid, at plant. Partial oxidation: Manufacturing process starting with heavy fuel oil, air and electricity is considered, plus auxiliaries, energy, transportation, infrastructure and land use, as well as wastes and emissions into air and water. Transport of the raw materials, auxiliaries and wastes is included, transport and storage of the product are not included. Carbon Dioxide is the byproduct generated. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Values are taken principally from EFMA 2000 and Frischknecht 1999 (see report). Inventory refers to 1 kg 100% ammonia, at plant.	European average values Values based on reports from 1995 and 2000, and on literature with data from unknown date.	2,112	nein
CS	Ammoniak 25%	Keine Daten verfügbar		Herstellung angenähert aus Ammoniak und techn. Wasser. Berechnung über Massenprozent	0,2275 kg Ammoniak + 0,6825 kg techn. Wasser q(25%NH ₃)=0,91 g/cm ³ -- > m(25%NH ₃)=227,5g -- > m(H ₂ O)=682,5g	-	nein

I	Diammonium-hydrogen-phosphat / diammonium phosphate	Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Ecoinvent report version 2.0, Nemecek, T., Kägi, T., Blaser, S. 2007	1999, RER	The unit process inventory takes into account the production of diammonium phosphate from ammonia and phosphoric acid. Transports of raw materials and intermediate products to the fertiliser plant as well as the transport of the fertiliser product from the factory to the regional department store were included. Production and waste treatment of catalysts, coating and packaging of the final fertiliser products were not included. Diammonium phosphate, as N, at regional storehouse/ diammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse: Refers to 1 kg N, resp. 1 kg P2O5 in diammonium phosphate with a N-content of 18.0% and a P2O5-content of 46.0%. The multioutput-process 'diammonium phosphate, at regional storehouse' delivers the co-products 'diammonium phosphate, as N, at regional storehouse' and 'diammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse'. Allocation factors are based on the energy requirements of the respective nutrients for the production processes: 60% for 'diammonium phosphate, as N, at regional storehouse' and 40% for 'diammonium phosphate, as P2O5, at regional storehouse' (exceptions see report). The allocated inventories must always be used simultaneously.	According to the reference of this inventory, the European average is derived from mean values of several fertiliser plants within Europe. The production of raw materials and/or intermediates outside Europe was taken into account by considering the production technology in the respective country and the relative import shares.	2,3802 0,6 kg as N 2,887 0,4 kg as PO4 1,6197	nein
CS	Antibiotika (Kanamycin)	Keine Daten verfügbar	1993, DE	Kanamycinherstellung angenähert über biotechnologische Synthese mit <i>S. kanamyceticus</i> aus Glucose (als Ersatz für Stärke und Sojamehl), Strom (beispielhafter Energieverbrauch 8374 kJ) und Sojaöl als Antischaummittel. Aus 200 L Fermentationslösung 50 g Kanamycin. 	keine Datensätze auffindbar	-	nein
I	Chlorwasserstoff / hydrochloric acid, 36% in H2O, from reacting propylene and chlorine, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J. JChudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1997-2000, RER	Multi-output process that produces three outputs from the reaction of propylene with chlorine: allyl chloride, hydrochloric acid (36wt%) and 1,3-dichloropropene. Liquid propene is reacted with gaseous chlorine		0,80172	nein
I	Dampf / steam, for chemical processes, at plant	Life Cycle Inventories of Detergents, Final report ecoinvent data v2.0, Zah R., Hischier R. 2007	1992-1995, RER	Input of water and energy for the production of steam. No further infrastructure is included, as the heating infrastructure is part of the respective heating modules used	value represents average steam production of 11 European chemical sites	0,23364	ja, Nebenprodukte anderer Prozesse
I	Druckluft / compressed air, average generation, >30kW, 6 bar gauge, at compressor	Life Cycle Inventories of Metal Processing and Compressed Air Supply, Final report ecoinvent Data v2.0, Steiner, R., Frischknecht, R. 2007	2006-2007, RER	This dataset includes the compressor, operating materials (lubricating oil), the electricity consumption as well as the transports of the compressor and the lubricant to the installation site. The installation at the site is not included. As there is some variation from factory to factory with regard to the LCI, it is advised that in case this dataset becomes important in the results, it is recommended to investigate further if the assumptions made for this dataset are applicable or not.	Geographical coverage encompasses the industrialised countries. Betriebs(über)druck [bar]: 2 bar Druckluftverluste der Leitungen [%] Standard: 25 % Energieverbrauchsklasse: 3, gute Anlage	0,083141 pro m ³	ja, compressed air, best generation, >30kW, 6bar
	Druckluft / compressed air, best generation, >30kW, 6 bar gauge, at compressor	Life Cycle Inventories of Metal Processing and Compressed Air Supply, Final report ecoinvent Data	2006-2007, RER	This dataset includes the compressor, operating materials (lubricating oil), the electricity consumption as well as the transports of the compressor and the lubricant to the installation site. The installation at the site is not included. As there is some variation from factory to factory with regard to the LCI, it is advised that in case this dataset becomes important in the results, it is recommended to	Geographical coverage encompasses the industrialised countries. Betriebs(über)druck [bar]: 2 bar Druckluftverluste der Leitungen [%] Stan-	0,055044 pro m ³	ja, compressed air, average generation, >30kW,

		v2.0, Steiner, R., Frischknecht, R. 2007		investigated further if the assumptions made for this dataset are applicable or not.	Standard: 25 % Energieverbrauchs-kategorie: 3, gute Anlage		6bar
1, 2	Strom, Mittelspannung, Produktion UCTE, ab Netz/ electricity, medium voltage, production UCTE, at grid	Strommix und Stromnetz Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6ecoinvent data v2.0 Frischknecht, R., Tuchschnid, M., Faist Emmenegger, M., Bauer, C., Dones, R. 2007	2007, UCTE	included are the electricity production in UCTE, the transmission network and direct SF6-emissions to air. Electricity losses during medium-voltage transmission and transformation from high-voltage are accounted for. This dataset describes the transformation from high to medium voltage as well as the transmission of electricity at medium voltage. Average technology used to transmit and distribute electricity. Includes underground and overhead lines, as well as air-, vacuum- and SF6-insulated high-to-medium voltage switching stations. Electricity production according to related datasets	Data apply to public and self producers. Geographical classification according to IEA. Assumptions for transmission network, losses and emissions are based on Swiss data.	0,52945 pro kWh	ja, unzählige
1'	Strommix, Produktion DE/ electricity, production mix DE	Strommix und Stromnetz, Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6ecoinvent data v2.0, Frischknecht, R., Tuchschnid, M., Faist Emmenegger, M., Bauer, C., Dones, R. 2007	2007, DE	It includes the shares of domestic electricity production by technology at the busbar. It does not include transformation, transport nor distribution losses.	Electricity domestic net production shares are based on annual averages. No technology description is provided because the dataset just describes the power plant portfolio of the respective country using current (2004) average technology per energy carrier.	0,66357 pro kWh	ja, unzählige
1	Energie, thermisch / heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW	Erdöl, Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6ecoinvent data v2.0, Jungbluth, N. 2007	2000, RER	Heat delivered by the furnace not including losses during distribution in the factory. Inventory for heat supply.	Non-modulating furnace, efficiency 95%. Assumption for operation in Europe.	0,091032 pro MJ	
1'	Energie, thermische / heat, unspecific, in chemical plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A.	1989-1997, RER	Includes the heat production needed for the production of 1 MJ (=0.3636 kg) steam from cold water. Does not include the water input because steam is often used in closed systems. To be used for heat energy production in average chemical plant.	Data from Europe	0,09964	nein
2	Essigsäureanhydrid / acetic anhydride, at plant	Life Cycle Inventories of Petrochemical Solvents, Final report ecoinvent Data v2.0, Sutter, J. 2007	2005-2006, RER	Acetic anhydride production mix in Europe	The inventory is modelled for Europe. Time of publications	2,5302	nein
2, ES	Galactose	Keine Daten verfügbar		Galactose für Synthese von IPTG angenähert über Glucose, d.h. Zucker, aus Zuckerrohr. [RER]		0,2046	nein
1, ES	Glucose / sugar, from sugarcane, at sugar refinery	Life Cycle Inventories of Bioenergy, Final report ecoinvent data v2.0, Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C., Sutter J. 2007	1994-2006, BR	Inventory refers to the production of 1 kg sugar, respectively 1 kg of ethanol (95% w/w dry basis, i.e. 1.05 kg hydrated ethanol 95% wet basis), 1 kg of excess bagasse (wet basis, 79% dry matter), 1 kWh of electricity and 1 kg of vinasse. The multioutput-process 'sugarcane, in sugar refinery' delivers the co-products 'sugar, from sugarcane, at sugar refinery' and 'ethanol, 95% in H2O, from sugarcane molasses, at sugar refinery', 'bagasse, from sugarcane, at sugar refinery', 'electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery' and 'vinasse, from sugarcane molasses, at sugar refinery'. Economic allocation with allocation factor for common sugar production stages of 80-85% to sugar, 10-11% to ethanol. Allocation according to carbon balance for CO2.	Data is from various sugar and ethanol producers in Brazil; some data is adapted from sugar producer in CH	0,2046	ja, Zucker aus Zuckerrüben
1', ES	Glucose / sugar, from sugar beet, at	Life Cycle Inventories of Bioenergy,	1998-2005, CH	This dataset includes the transport of sugar beets to the sugar refinery, and the processing of sugar beets to sugar, molasses (72% dry matter) and pulps (25.6% dry matter).	Inventory refers to the production of 1 kg sugar, respectively 1	0,50642	ja, Zucker aus Zucker-

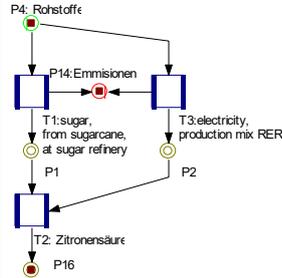
	sugar refinery	Final report ecoinvent data v2.0, Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C., Sutter J. 2007		System boundary is at the sugar refinery. Treatment of waste effluents is included. Packaging of the sugar is not included.	kg of molasses (72% dry matter) and 1 kg of pulps (25.6% dry matter). The multioutput-process 'sugar beet, in sugar refinery' delivers the co-products 'sugar, from sugar beet, at sugar refinery' and 'molasses, from sugar beet, at sugar refinery' and 'pulps, from sugar beet, at sugar refinery'. Economic allocation with allocation factor for common stages of 91.7% to sugar, 4.5% to molasses and 3.8% to pulps. Allocation is done according to carbon balance for CO2 emissions.		rohr
1	Harnstoff / urea, as N, at regional storage	Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems, Ecoinvent report version 2.0, Nemecek, T., Kägi, T., Blaser, S. 2007	1999, RER	The unit process inventory takes into account the production of urea from ammonia and carbon dioxide. Transports of the intermediate products were included as well as the transport of the fertiliser product from the factory to the regional storehouse. Production and waste treatment of catalysts, coating and packaging of the final fertiliser products were not included. CO2-consumption (733 kg CO2/ton of urea) during production of urea was not included, since CO2 arises as a by-product during the production of ammonia. Infrastructure was included by means of a proxy module. Refers to 1 kg N, resp. 2.17 kg urea with a N-content of 46.0%.	According to the reference used for this inventory, the European average is derived from mean values of several fertiliser plants within Europe. The production of raw materials and/or intermediates outside Europe was taken into account by considering the production technology in the respective country and the relative import shares. Year when the principal reference used for this inventory was published.	3,3102	nein
CS	IPTG	Modul in ecoInvent nicht verfügbar/keine Daten verfügbar		Prozess zur Herstellung angenähert über Synthese der Ausgangsstoffe Propanthiol, Penta-O-Acetylβ-D-Galactopyranose und Natriummethanolatsynthese.	 <p> $C_{16}H_{22}O_{11} + CH_3-CH_2-SH-CH_3 \rightarrow C_{17}H_{26}O_9S + CH_3COOH$ $C_{17}H_{26}O_9S + 4NaOMe \rightarrow C_9H_{14}O_5S + 4Na + 4C_3H_6O_2$ $M(C_{16}H_{22}O_{11})=390,34g/mol$ $M(C_3H_8S)=76,16g/mol$ $M(C_{17}H_{26}O_9S)=406,45g/mol$ $M(CH_3COOH)=60,05g/mol$ $M(C_9H_{14}O_5S)=238,30g/mol$ $M(Na)=22,99g/mol$ $M(C_3H_6O_2)=74,08g/mol$ $m(C_9H_{14}O_5S)=1kg$ $m(C_{17}H_{26}O_9S)=1,7056kg$ $m(NaOMe)=0,907kg$ $m(Na)=0,3859kg$ $m(C_3H_6O_2)=1,243kg$ </p>	-	nein
CS	Kaliumdihydrogenphosphat	Modul in Umberto nicht verfügbar/keine Daten verfügbar		Herstellung angenähert über die Herstellung aus Kaliumhydroxid und Phosphorsäure	 <p> $KOH + H_2PO_4 \rightarrow KH_2PO_4 + H_2O$ $M(KOH)=56,11g/mol$ $M(H_3PO_4)=98,00g/mol$ $M(KH_2PO_4)=g/mol$ $M(H_2O)=2,01588g/mol$ $m(KH_2PO_4)=1kg$ $m(KOH)=0,4878kg$ $m(H_3PO_4)=0,852kg$ $m(H_2O)=0,0179kg$ </p>	-	nein
1	Kaliumhydroxid/potassium	Life Cycle Inventories of Bioenergy,	1998-204, RER	Potassium hydroxide is manufactured by the electrolysis of potassium chloride brine in electrolytical cells		1,9059	nein

	hydroxide, at regional storage	Final report ecoinvent data v2.0, Jungbluth N., et al. 2007					
I	Kühlenergie/ cooling energy, natural gas, at cogen unit with absorption chiller 100 kW	Life Cycle Inventories of new CHP systems, Final report ecoinvent Data v2.0, Primas A. 2007	2000-2005, CH	The module includes heat input from a 160kWel cogeneration unit, electricity and water needed for operation and infrastructure (absorption chiller, air cooler, piping). The module reflects an absorption chiller operated with heat from a natural gas operated cogeneration unit (allocation exergy). Life time for the total system assumed with 20 years or 20'000 full operating hours.	Natural gas input for cogeneration unit and electricity demand modelled for Switzerland. Process applicable in central European conditions.	0,057053	nein
I	Magnesiumsulfat/ magnesium sulphate, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Hischer R., Final report ecoinvent data v2.0 2007	2000, RER	Raw materials, machineries and energy consumption for production, estimated emissions to air from production and infrastructure of the site (approximation). No water emissions.	The functional unit represent 1 kg of magnesium sulphate. Large uncertainty of the process data due to weak data on the production process.	0,29695	nein
CS	Methanol / methanol, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1994-2001, GLO	Raw materials, processing energy, estimate on catalyst use, emissions to air and water from process, plant infrastructure . The process describes the production of methanol from natural gas. The process refers on a steam reforming process to obtain syn-gas for the production of methanol. No CO2 use, no Hydrogen production (assumed as burned in the furnace). Data refers to steam reforming of natural gas. Other reforming technologies used for to determine the uncertainty. Only production from natural gas included. Production assessed with mixed data from literature and plant reports on plant design or efficiency. Representativity of the data concerning energy seems good Representativity concerning the actual average emission levels is much lower. It was assumed that the data cover about 50-60% of the production. About 90% of the world wide production is from natural gas. 60% of the natural gas operated plant work with the steam reforming process.	28.2 Mt world wide in 2000. Data from various plants of different locations. Data mainly from literature and articles related with plant design.	0,74477	ja, (methanol from regional storage, CH, 0,79983)
CS	Natriumacetat	Modul in ecoInvent-Bibliothek nicht verfügbar		Natriumacetat für Synthese von IPTG angenähert über stöchiometrische Synthese aus Essigsäure und Natriumhydroxid. 	$CH_3COOH + NaOH \rightarrow CH_3COONa + H_2O$ $M(CH_3COOH) = 60,05 \text{ g/mol}$ $M(NaOH) = 39,99 \text{ g/mol}$ $M(CH_3COONa) = 80,03 \text{ g/mol}$ $m(CH_3COONa) = 1 \text{ kg}$ $m(CH_3COOH) = 0,75 \text{ kg}$ $m(NaOH) = 0,5 \text{ kg}$	-	nein
I	Natriumchlorid / sodium chloride, powder, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	2000, RER	this module includes the solution mining process of sodium chloride, its cleaning from impurities, and the drying step. It is sold as bulk and therefore no packaging materials are included.	data from one European solution mining site - used to represent the European mix of 41% solution mining and 59% rock salt	0,18035	nein
I	Natriumchlorid / sodium chloride, brine solution, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1994, RER	this module includes the solution mining process of sodium chloride for the preparation of a brine for industrial use. No cleaning or drying step are therefore included.	estimation, based on one European literature source - valuable for european situation	0.1132	nein

1	Natriumhydroxid / sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	2000, RER	Process establishing an average European sodium hydroxide production from the three different electrolysis cell technologies (mercury, diaphragm, membrane) Modul that establishes only an average of the different technologies used for sodium hydroxide production - thus no process-specific emissions are included into this dataset. Process establishing an average European sodium hydroxide production from the three different electrolysis cell technologies (mercury, diaphragm, membrane)	European average values für 1 kg Natriumhydroxid 50%, production mix 0,551 kg aus Amalganverfahren 0,235 kg aus Diaphragmverfahren 0,214 kg aus Membranverfahren	1,0973	nein
CS	Natriummethanolat	Modul in ecoInvent-Bibliothek nicht verfügbar		Natriummethanolat angenähert über stöchiometrische Synthese aus Methanol und Natrium. 	$2\text{Na} + 2\text{MeOH} \rightarrow 2\text{NaOMe} + \text{H}_2$ M(Na)=22,99g/mol M(MeOH)=32,04g/mol M(NaOMe)=54,02g/mol M(H ₂)=2g/mol m(CH ₃ NaO)=1kg m(MeOH)=0,593kg m(Na)=0,4256kg m(H ₂)=0,0185kg	-	nein
CS	Nitromethan	Modul in ecoInvent-Bibliothek nicht verfügbar		Vorstufe von Tris(hydroxymethyl)-aminomethan. Prozess über die Synthese von Propan und Salpetersäure angenähert. 	$\text{HNO}_3 + \text{C}_3\text{H}_8 \rightarrow \text{CH}_3\text{NO}_2 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ M(HNO ₃)=63,01g/mol M(C ₃ H ₈)=44,1g/mol M(CH ₃ NO ₂)=61,04g/mol M(C ₂ H ₅ OH)=46,07g/mol m(CH ₃ NO ₂)=1kg m(HNO ₃)=1,032kg m(C ₃ H ₈)=0,722kg m(C ₂ H ₅ OH)=0,754kg	-	nein
CS	Penta-O-Acetyl-β-D-Galactopyranose	Modul in ecoInvent-Bibliothek nicht verfügbar		Penta-O-Acetyl-β-D-Galactopyranose für Synthese von IPTG angenähert über stöchiometrische Synthese aus Natriumacetat, Essigsäureanhydrid und Galactose. 	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 5\text{CH}_3\text{COONa} \rightarrow \text{C}_{16}\text{H}_{22}\text{O}_{11} + 5\text{OH}^- + 5\text{Na}$ M(C ₆ H ₁₂ O ₆)=180,16g/mol M(CH ₃ COONa)=82,03g/mol M(C ₁₆ H ₂₂ O ₁₁)=390,34g/mol M(OH ⁻)=17g/mol M(Na)=22,98g/mol m(C ₁₆ H ₂₂ O ₁₁)=1kg m(C ₆ H ₁₂ O ₆)=0,4612kg m(CH ₃ COONa)=1,04998kg m(Na)=0,294kg m(OH ⁻)=0,2176	-	nein
2	Phosphorsäure /phosphoric acid, industrial grade, 85% in H ₂ O, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1990-1994, RER	Raw materials, processing chemicals and processing energy, direct emissions to water from process, disposal of solid process waste to landfill and of spent solvent to incineration, estimations on of raw materials transport to the plant, approximation process for infrastructure. Average phosphoric acid production from wet phosphate rock with the dihydrate process in the United States (Florida) and from dry phosphate rock with the dihydrate process in Morocco as resource considered. Data includes concentration of acid after purification to 85% H ₃ PO ₄ content. Estimations made on the type and amount of solvents used. Composition of solid production wastes calculated with average content of crude phosphoric acid.	Data from one site in United Kingdom used. No data of other sites within Europe considered.	1,4201	nein

2	Propan/Butan / propane/butane, at refinery	Erdöl, Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6 ecoinvent data v2.0, Jungbluth, N. 2007	1980-2000, RER	All processes on the refinery site excluding the emissions from combustion facilities, including waste water treatment, process emissions and direct discharges to rivers. Description of all flows of materials and energy due to the throughput of 1kg crude oil in the refinery. The multioutput-process 'crude oil, in refinery' delivers the co-products petrol, unleaded, bitumen, diesel, light fuel oil, heavy fuel oil, kerosene, naphtha, propane/ butane, refinery gas, secondary sulphur and electricity. The impacts of processing are allocated to the different products.	Assumption for the European average. Statistical data for the throughput and production volumes were available for the year 2000. Major indicators like energy use have been estimated based on a survey in European refineries. Other data and indicators have been estimated based on different environmental reports.	0,60501	ja (propane/ butane at refinery, CH ₄ , 0,69715)
2, CS	Propanthiol	Modul in ecoInvent-Bibliothek nicht verfügbar		Propanthiol für Synthese von IPTG angenähert über stöchiometrische Synthese aus Propan und Schwefel. 	CH ₂ -CH ₂ -CH ₃ + S -> CH ₃ -CH ₂ -SH-CH ₃ M(CH ₃ CH ₂ CH ₃)=44,10g/mol M(S)=32,06g/mol M(C ₃ H ₈ S)=76,16g/mol m(C ₃ H ₈ S)=1kg m(C ₃ H ₈)=0,579kg m(S)=0,4209kg	-	nein
2	Salpetersäure / nitric acid, 50% in H ₂ O, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1990-2001, RER	The inventory includes the oxidation of ammonia and the absorption steps and the final dilution of the acid. Manufacturing process starting with ammonia is considered, plus consumption of auxiliaries, energy, infrastructure and land use, as well as generation of wastes and emissions into air and water. Transport of the raw materials, auxiliaries and wastes is included, transport and storage of the final product nitric acid are not included. No byproducts or coproducts are considered. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Solid wastes are assumed to be sent to landfill. Average values, based on Patyk 1997 and others (see report). Inventory refers to 1 kg 100% nitric acid.	European average values Values based basically on literature using data from the 1990s and on reports from 2000-2001, mostly average technology (Patyk 1997) used in european weak nitric acid production plants.	3,1742	nein
1	Salzsäure, konz. / hydrochloric acid, 30% in H ₂ O, at plant	Life Cycle Inventories of Bioenergy, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischier R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1997-2000, RER	Precursor compounds, auxiliary materials, transports, infrastructure. This report assumes that HCl is generated from combustion of chlorine with hydrogen HCl is also produced as a by-product by several processes (TDI, MDI, fluorocarbons), for which no allocation was carried out, in part due to a lack of data.	based on literature data and plant data in Europe and North America	0,85292	ja, 36%ige
2	Salzsäure 36%/ hydrochloric acid, 36% in H ₂ O, from reacting propylene and chlorine, at plant	Life Cycle Inventories of Bioenergy, Final report ecoinvent data v2.0, Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emmenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C., Sutter J. 2007	1998-2004, RER	Multi-output process that produces three outputs from the reaction of propylene with chlorine: allyl chloride, hydrochloric acid (36wt%) and 1,3-dichloropropene. Liquid propene is reacted with gaseous chlorine	based on industry data in the US and Europe	0,079455	ja, 30%ige
2, ES	Sojaöl / soya oil, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent 2000, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischier R.,	1998, RER	The inventory includes the conditioning (but not the drying) of the beans previous extraction. It also includes the production of soya scrap. Manufacturing process starting with dry soya beans (basically imported from overseas) is considered, plus consumption of auxiliaries, energy, infrastructure and land use, as well as generation of emissions into air and water. Transport of the raw materials and auxiliaries is also included. The generation of the co-product soya	values from literature, some values provided by European manufacturing companies whose representativeness for the European soya oil industry is unknown. Literature base on data	1,8314	nein

		Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2004		scrap is considered. 28% of the inputs and outputs are allocated to soya oil and 72% to soya scrap. (basing on price) Generation and transportation of solid wastes are not included due to the lack of data. Transport and storage of the final products are not included. Transient or unstable operations are not considered, but the production during stable operation conditions. Emissions to air are considered as emanating in a high population density area. Emissions into water are assumed to be emitted into rivers. Inventory refers to 1 kg soya oil. The module "pentane" is used to report the consumption of hexane, since the latter is not available in ecoinvent database. Main literature sources are Reusser 1994, Cederberg 1998 and von Däniken et al. 1995.	mostly from the 1990s.		
1	Transport, Lkw >16t, Flottendurchschnitt/transport, lorry >16t, fleet average	Life Cycle Inventories of Transport Services Final report ecoinvent Data v2.0 Spielmann M., Dones R; Bauer C., 2007	2005, RER	Inventory refers to the entire transport life cycle. For road infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross tonne kilometre performance. Expenditures due to operation of the road infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly vehicle kilometre performance. For the attribution of vehicle share to the transport performance a vehicle life time performance of 540000 tkm/vehicle has been assumed.	The data for vehicle operation and road infrastructure reflect Swiss conditions. Data for vehicle manufacturing and maintenance represents generic European data. Data for the vehicle disposal reflect the Swiss situation.	0,12534	ja, unzählige
1	Transport, Fracht, Schiene/transport, freight, rail	Life Cycle Inventories of Transport Services Final report ecoinvent Data v2.0 Spielmann M., Dones R; Bauer C., 2007	2000, RER	Inventory refers to the entire transport life cycle. For rail infrastructure, expenditures and environmental interventions due to construction, renewal and disposal of roads have been allocated based on the Gross tonne kilometre performance. Expenditures due to operation of the rail infrastructure, as well as land use have been allocated based on the yearly train kilometre performance.	Data refers to average transport conditions in Europe (EU 15: Austria, Belgium, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Portugal, Spain, Sweden and the UK). The data for rail infrastructure reflect Swiss conditions. Data for vehicle manufacturing and maintenance represents generic European data. Data for the vehicle disposal reflect Swiss situation.	0,039386	nein
1	Transport, Frachter Übersee/transport, transoceanic freight ship	Life Cycle Inventories of Transport Services Final report ecoinvent Data v2.0 Spielmann M., Dones R; Bauer C., 2007	2000, OCE	Inventory refers to the entire transport life cycle. Port infrastructure expenditures and environmental interventions are allocated based the yearly throughput (0.37). Vessel manufacturing is allocated based on the total kilometric performance (2'000'000km) and its transport performance (50000/unit). For each transport activity 2 ports are required.	Data from one port in Netherlands is employed as an estimate for international water transportation.	0,010732	nein
CS	Tris(hydroxymethyl)-aminomethan	keine Daten verfügbar		<p>Prozess angenähert über die Herstellung aus Tris(hydroxymethyl)-nitromethan und dessen Herstellung aus Formaldehyd, Nitromethan und konz. Salzsäure</p> <p>The diagram illustrates the chemical synthesis process. It starts with raw materials (P4) which are processed into formaldehyde (P8), nitromethan (P3), and hydrochloric acid (P1). Formaldehyde (P8) is used to produce Tris(hydroxymethyl)nitromethan (T1). Nitromethan (P3) and hydrochloric acid (P1) are used to produce Tris(hydroxymethyl)aminomethan (T2). The final product (T2) is then used to produce Tris(hydroxymethyl)aminomethan (T2) and Chlor (T4).</p>	<p>I. $\text{CH}_3\text{NO}_2 + 3\text{CH}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNO}_2$ II. $(\text{CH}_2\text{OH})_2\text{CNO}_2 \rightarrow (\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNH}_2$ $[\text{6H}_3\text{O} + 6\text{Cl}^- \rightarrow 8\text{H}_2\text{O} + 3\text{Cl}_2]$ $M(\text{CH}_3\text{NO}_2)=61,04\text{g/mol}$ $M(\text{CH}_2\text{O})=30,03\text{g/mol}$ $M((\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNO}_2)=151,12\text{g/mol}$ $M((\text{CHOH})_3\text{CNH}_2)=121,14\text{g/mol}$ $M(\text{H}_3\text{O}^+)=19\text{g/mol}$ $M(\text{Cl}^-)=35,45\text{g/mol}$ $M(\text{H}_2\text{O})=18\text{g/mol}$ $M(\text{Cl}_2)=70,9\text{g/mol}$ I. $m((\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNO}_2)=1\text{kg}$ $m(\text{CH}_3\text{NO}_2)=0,4039\text{kg}$ $m(\text{CH}_2\text{O})=0,59615\text{kg}$ II. $m(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNH}_2=1\text{kg}$ $m(\text{CH}_2\text{OH})_3\text{CNO}_2=1,247\text{kg}$ $m(\text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-)=2,696\text{kg}$ $m(\text{H}_2\text{O})=1,1887\text{kg}$ $m(\text{Cl}_2)=1,7558\text{kg}$</p>	-	nein
1	Wasser, techn. /	Erdöl, Sachbilanzen von	1993, RER	Use of chemicals and some emissions for the treatment of water used in power plants.	Data provided by CH company. Water	2,45E-05	nein

	water, completely softened	Energiesystemen. Final report No. 6 ecoinvent data v2.0, Jungbluth, N. 2007		Rough estimation for the process.	treatment by ion-exchanger for the use as cooling water in power plants. Time of publication. Water treatment by ion-exchanger for the use as cooling water in power plants.		
2	Wasserstoff / hydrogen, liquid, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	1997-2000, RER	95% of hydrogen is produced from cracking of fossil fuels, the remaining 5% from electrolysis of salt brine.	based on literature data	1,6658	
CS	Zitronensäure	kein Datensatz in Umberto verfügbar Taschenatlas der Biotechnologie und Gentechnik, S20/21		Produktion über Aspergillus Niger, 5 Tage Wachstum mit Glucose, 80 % Zitronensäure für eingesetzte Glucose, Strom (beispielhafter Energieverbrauch 8374 kJ), keine Reinigungsaufwendungen berücksichtigt. 	2,325 kWh elektrische Energie + 1kg Zucker -> 0,8 kg Zitronensäure		nein

2. Vergleichsmaterialien

Modul/ Stoff	Daten-herkunft Literatur-quellen	Bezug-jahr, geographischer Bezug	Kurzbeschreibung, Annahmen, Vorketten, Transporte	Datenqualität / Anmerkungen	CO2-eq/kg 100a (CML 2001)	anderer Datensatz vorhanden
Glasfaser, ab Werk / glass fibre, at plant	Life Cycle Inventories of Building Products, Final report ecoinvent data v2.0, Kellenberger D., Althaus H.-J., Jungbluth N., Künniger T. 2007	2000, RER	Gate to gate inventory for the production of glass fibre. Inventory based on a state of the art report for the European glass manufacturing industry. Data had to be estimated from ranges given for different parameters.	26 furnaces operating at 12 sites in Europe	2,6351	nein
Nylon 66, ab Werk / nylon 66, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Final report ecoinvent data v2.0, Hischer R. 2007	1996-2001, RER	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant. Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N2 / O2 consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.	4 European production sites, production out of hexamethylene diamine and adipic acid	8,0191	nein
Polycarbonat, ab Werk / polycarbonate, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Final report ecoinvent data v2.0, Hischer R. 2007	1996-2001, RER	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant. Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N2 / O2 consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.	3 European production sites, production by interfacial polycondensation out of phosgene and bisphenol A	7,7876	nein
Polyethylen-Granulat, HDPE, ab Werk / polyethylene, HDPE, granulate, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Final report ecoinvent data v2.0, Hischer R. 2007	1999-2001, RER	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant. Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N2 / O2 consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC	24 European production sites, polymerization out of ethylene under normal pressure and temperature	1,9485	nein

	R. 2007		emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.			
Polyethylen-Granulat, LDPE, ab Werk / polyethylene, LDPE, granulate, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Final report ecoinvent data v2.0, Hirsch R. 2007	1999-2001, RER	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N ₂ / O ₂ consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.	27 European production sites, polymerization out of ethylene at high pressure and high temperature	2,1026	nein
Polypropylen-Granulat, ab Werk / polypropylene, granulate, at plant	Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Paper, Final report ecoinvent data v2.0, Hirsch R. 2007	1999-2001, RER	Aggregated data for all processes from raw material extraction until delivery at plant Data are from the Eco-profiles of the European plastics industry (PlasticsEurope). Not included are the values reported for: recyclable wastes, amount of air / N ₂ / O ₂ consumed, unspecified metal emission to air and to water, mercaptan emission to air, unspecified CFC/HCFC emission to air, dioxin to water. The amount of "sulphur (bonded)" is assumed to be included into the amount of raw oil.	28 European production sites, 7.40 Mt (1999) production volume, literature values based on company survey	1,9825	nein
Stahl, Chromstahl 8/18, ab Werk / chromium steel 18/8, at plant	Life Cycle Inventories of Metals, Final report ecoinvent data v2.0, Classen M., Althaus H.-J., Blaser S., Doka G., Jungbluth N., Tuchschnid M. 2007	2000-2002, RER	Mix of differently produced steels and hot rolling represents Average of World and European production mix. This is assumed to correspond to the consumption mix in Europe	Data relate to plants in the EU, stainless steel, high alloyed steel	4,5315	nein
Stahl, niedriglegiert, ab Werk / steel, low-alloyed, at plant	Life Cycle Inventories of Metals, Final report ecoinvent data v2.0, Classen M., Althaus H.-J., Blaser S., Doka G., Jungbluth N., Tuchschnid M. 2007	2001, RER	Transports of hot metal and other input materials to converter, steel making process and casting. This process produces primary steel. Scrap is only used for cooling the liquid steel.	Data relate to plants in the EU	2,0924	nein
Polylactide, Granulat, ab Werk / polylactide, granulate, at plant	Life Cycle Inventories of Renewable Materials, Final report ecoinvent Data v2.0, Althaus H.J., Dinkel F., Werner F. 2007	2006-2007, GLO	The publication contains only cumulative results. So the emissions from energy consumption, waste water treatment and raw material inputs have been subtracted resulting in a difference in NMVOC emissions shown in this process. Inventory refers to the production of 1 kg PLA. It is based on data from the world largest PLA plant. The inventories include the LCI data from the report of the producer NatureWorks. In this publication only aggregated data are reported. To get more transparency and to be in accordance with other ecoinvent processes and the guideline the data has been splitted up in maize production, energy use, transport and waste water treatment. The infrastructure has been added. In the published data from the plant in Nebraska the carbon dioxide emissions are offset by wind power certificates. This is not an intrinsic property of the PLA production, but specific to this plant. It is why in this process for the electricity production the UCTE Mix has been chosen. If the polymer is produced by NatureWorks in Nebraska the specific process should be used.	Based on the data of the production of 1 kg PLA in Nebraska by NatureWorks. The electricity mix was changed to UCTE Mix to get a more general process being a better approach for other geographical locations, than this specific site.	3,1189	nein

3. Betrachtung Spinnenseiden-Nanogewebe

Modul/ Stoff	Daten-herkunft Literatur-quellen	Bezug-jahr, geographischer Bezug	Kurzbeschreibung, Annahmen, Vorketten, Transporte	Datenqualität / Anmerkungen	CO ₂ - eq/kg 100a (CML 2001)	anderer Datensatz vorhanden
Vliesherstellung, Polyethylen-terephthalat / fleece production, polyethylene terephthalate	Ökologische Aspekte der Komfortlüftungen im Wohnbereich, Final report ecoinvent Data v2.0, Hässig, W., Primas, A. 2007	2007, RER	Estimation of electricity and fuel use for the production steps. No raw materials and transports of raw materials to the plant included. Infrastructure of the production plant not included. Data derived from: Laursen, S. E., Hansen, J., Bagh, J., Jensen O. and Werther, I., Environmental Assessment of Textiles. Life Cycle Screening of Textiles containing Cotton, Wool, Viscose, Polyester or Acrylic Fibres, Miljøstyrelsen Miljøprojekt nr. 369, DTI Clothing and Textile, dk-TEKNIK, Danmark, 1997.	Data used has no specific geographical origin (literature values). Approximation from data of polyester yarn production. No raw material included.	5,6059	nein
Entsorgung, Bioabfall, 60% H ₂ O, in	Life Cycle Inventories of Bioenergy, Final	2007, CH	transport to incinerator. waste-specific air and water emissions from incineration, auxiliary material consumption for flue gas cleaning. Short-term emissions to river	Specific to the technology mix encountered in Switzerland in	0,031075	ja, disposal biowaste

Kehrichtverbrennung, Allokation Preis / disposal, biowaste, 60% H ₂ O, to municipal incineration, allocation price	report ecoinvent data v2.0, Jungbluth N., Chudacoff M., Dauriat A., Dinkel F., Doka G., Faist Emenegger M., Gnansounou E., Kljun N., Spielmann M., Stettler C., Sutter J. 2007		water and long-term emissions to ground water from slag compartment (from bottom slag) and residual material landfill (from solidified fly ashes and scrubber sludge). Process energy demands for MSWI. Incinerated amount = 1kg. Incinerated waste contains 100% biowaste; waste composition (wet, in ppm): upper heating value 6.82 MJ/kg; lower heating value 5.104 MJ/kg; H ₂ O 600000; O 126430; H 20000; C 162400; S 1499.3; N 4000; P 1130; B 10.24; Cl 4000; Br 6; F 200; I 0.055; Ag n.a.; As 2; Ba n.a.; Cd 0.138; Co 5; Cr 8; Cu 18; Hg 0.07; Mn 4.3; Mo 0.4; Ni 5.42; Pb 18.56; Sb n.a.; Se 0.49976; Sn 7.9961; V 2.9985; Zn 58.24; Be n.a.; Sc n.a.; Sr n.a.; Ti n.a.; Tl n.a.; W n.a.; Si 39980; Fe 600; Ca 21800; Al 9995.1; K 3500; Mg 2820; Na 1500; Share of carbon in waste that is biogenic 100%. Share of iron in waste that is metallic/recyclable 0%. Net energy produced in MSWI: 0.15MJ/kg waste electric energy and 0.47MJ/kg waste thermal energy One kg of this waste produces 0.1337 kg of slag and 0.01883 kg of residues, which are landfilled. Additional solidification with 0.007533 kg of cement.	2000. Well applicable to modern incineration practices in Europe, North America or Japan		to agricultural cofermentation & disposal biowaste to anaerobic digestion
Holzkohle, ab Werk / charcoal, at plant	Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material, Final report ecoinvent data v2.0, Werner F., Althaus H.-J., Küniger T., Richter K., Jungbluth N.	2007, GLO	Production of charcoal from forest wood including emissions. Infrastructure can be considered of minor importance and is neglected. A series of decomposition reactions take place when wood is heated in the absence of atmospheric oxygen above 100°C. Macromolecular chains of the wood components depolymerise to a variety of smaller molecules. Lower heating value 30 MJ/kg.	Most of global production takes place in South America and Asia. Background data were available only for Europe.	1,1218	nein
Isopropanol, ab Werk / isopropanol, at plant	Life Cycle Inventories of Chemicals, Final report ecoinvent data v2.0, Althaus H.-J., Chudacoff M., Hischer R., Jungbluth N., Osses M., Primas A. 2007	2000, RER	Raw materials and chemicals used for production, transport of materials to manufacturing plant, estimated emissions to air and water from production (incomplete), estimation of energy demand and infrastructure of the plant (approximation). Solid wastes omitted. The functional unit represent 1 kg of liquid isopropanol. Large uncertainty of the process data due to weak data on the production process and missing data on process emissions.	Data used has no specific geographical origin (stoichiometry). Average european processes for raw materials, transport requirements and electricity mix used.	1,8485	nein
Entsorgung, Polypropylen, 15.9% Wasser, in Kehrichtverbrennung / disposal, polypropylene, 15.9% water, to municipal incineration	Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services, Final report ecoinvent data v2.0, Doka G. 2007	1995-2000, CH	waste-specific air and water emissions from incineration, auxiliary material consumption for flue gas cleaning. Short-term emissions to river water and long-term emissions to ground water from slag compartment (from bottom slag) and residual material landfill (from solidified fly ashes and scrubber sludge). Process energy demands for MSWI. Inventoried waste contains 100% PP; . waste composition (wet, in ppm): upper heating value 36.16 MJ/kg; lower heating value 32.78 MJ/kg; H ₂ O 159000; O 32454; H 103430; C 694120; S 360.46; N 1095.3; P n.a.; B n.a.; Cl 1234.1; Br 8.0972; F 12.146; I n.a.; Ag n.a.; As 1.5385; Ba 202.43; Cd 28.663; Co 1.417; Cr 10.526; Cu 34.93; Hg 0.040486; Mn 25.371; Mo n.a.; Ni 0.80972; Pb 19.079; Sb 8.5021; Se 1.7004; Sn 3.2205; V 1862.4; Zn 288.78; Be 0.40486; Sc n.a.; Sr 71.661; Ti 809.72; Tl 0.32389; W n.a.; Si n.a.; Fe 1295.6; Ca 2186.3; Al 161.94; K n.a.; Mg 80.972; Na 1186.6; Share of carbon in waste that is biogenic 0%. Share of iron in waste that is metallic/recyclable 0%. Net energy produced in MSWI: 3.74MJ/kg waste electric energy and 7.54MJ/kg waste thermal energy Allocation of energy production: no substitution or expansion. Total burden allocated to waste disposal function of MSWI. One kg of this waste produces 0.01618 kg of slag and 0.004865 kg of residues, which are landfilled. Additional solidification with 0.001946 kg of cement.	Specific to the technology mix encountered in Switzerland in 2000. Well applicable to modern incineration practices in Europe, North America or Japan.	2,5352	ja, disposal Polypropylen in sanitary landfill

16 TABELLENVERZEICHNIS ANHANG

Tabelle Anhang 1:	Datenpunkte für Wachstum und Volumenzunahme im 100.000 l Fermenter .	185
Tabelle Anhang 2:	Datenpunkte für Wachstum und Sauerstoffverbrauch im 100.000 l Fermenter....	
	186
Tabelle Anhang 3:	Datenpunkte für Wachstum und Sauerstoffverbrauch in den Vorfermentern .	188
Tabelle Anhang 4:	Datenpunkte für Wachstum, Leistungsdichte, Begasungsrate und Stoffübergangskoeffizient im 100.000 l Fermenter.....	189
Tabelle Anhang 5:	Datenpunkte für Wachstum, Stromverbrauch und Wärmeeintrag im 100.000 l Fermenter	190
Tabelle Anhang 6:	Menge der Einsatzstoffe bei der Fermentation in der Batchphase	193
Tabelle Anhang 7:	Berechnete Mengen für die Fermentationen in der Batchphase.....	193
Tabelle Anhang 8:	Menge der Einsatzstoffe bei der Fermentation nach der Batchphase.....	193
Tabelle Anhang 9:	Berechnete Mengen für die Fermentation nach der Batchphase	194
Tabelle Anhang 10:	Zusammenfassung der bei der Fermentation verwendeten Parameter	194
Tabelle Anhang 11:	Gegenüberstellung der Ausgangswerte der Auslegung der Filtration.....	198
Tabelle Anhang 12:	Bedarf an Lösungen und technischem Wasser für die Filtrationsschritte mit Rohrmodul.....	198
Tabelle Anhang 13:	Berechneten Werte für die Auslegung der einzelnen Filtrationsstufen für das Rohrmodul.....	199
Tabelle Anhang 14:	Behältergrößen für die Bereitstellung an Lösungen für vier Batchreinigungen....	
	199
Tabelle Anhang 15:	Behälterabmessungen.....	199
Tabelle Anhang 16:	CIP-Verbrauch und entstehendes Abwasser bei einem 5 m ³ Batch	199
Tabelle Anhang 17:	Verbrauch an Kühlenergie für SIP und CIP pro 5 m ³ Batchvolumen	199
Tabelle Anhang 18:	Stoffmengen und Kühlenergie zur Reinigung des Prozessequipments	200
Tabelle Anhang 19:	Abwassermengen beim Rohrmodul bei den jeweiligen Prozessschritten bezogen auf 5 m ³ Batchvolumen	200
Tabelle Anhang 20:	Zusammenfassung abzuführender Wärmemengen pro 5 m ³ Batchvolumen... ..	200
Tabelle Anhang 21:	Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen pro 5 m ³ Batchvolumen... ..	200
Tabelle Anhang 22:	Zusammenfassung der elektrischen und der thermischen Energie für ein Batchvolumen von 5 m ³	200
Tabelle Anhang 23:	Zusammenfassung zuzuführender Wärmemengen für 5 m ³ Batch-volumen ..	201
Tabelle Anhang 24:	Bilanzparameter der SIP/CIP Reinigung im Keramik-Modul.....	201
Tabelle Anhang 25:	Bilanzparameter der SIP/CIP Reinigung im Rohrmodul	201
Tabelle Anhang 26:	Berechnung der Summenformel von Spinnenseide.....	204
Tabelle Anhang 27:	Input Stoffe für die Berechnung der Zusammensetzung „Abwasser nach Filtration und Ernte“: Massenanteile und Menge pro Liter.....	204
Tabelle Anhang 28:	Output Stoffe für die Berechnung der Zusammensetzung „Abwasser nach Filtration und Ernte“: Massenanteile und Menge pro Liter.....	205
Tabelle Anhang 29:	Massenanteile für die Berechnung „Abwasser nach Filtration und Ernte“	205
Tabelle Anhang 30:	Zusammensetzung „Abwasser nach Ernte und Filtration“, dem EcoInvent-Module „Entsorgung Bioabfall“, und der Neuberechneten Zusammensetzung „Abwasser nach Ernte und Filtration“.....	206

17 DANKSAGUNG

Was lange währt wird endlich gut! – Ich danke allen die mich auf dem langen Weg zum Abschluss dieser Dissertation begleitet haben.

An erste Stelle danke ich meinen Eltern, die mich immer darin bestärkt haben, mich Herausforderungen zu stellen, mir schon frühzeitig mehr zugetraut haben, als das meiste Lehrpersonal – ohne Euch wäre ich nie so weit gekommen. Für alles was ich erreicht habe wart ihr die Voraussetzung! Ebenso dank für die diversen Korrekturleserunden aller meiner Abschlussarbeiten! Manchmal kam es mir es schon so vor, als würde ich euch quälen, doch ihr habt es immer tapfer mitgemacht!

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Thomas Scheibel herzlichsten Dank. Er gab mir die Möglichkeit dieses spannende interdisziplinäre Thema zu er- und bearbeiten. Er blieb auch nach meinem Weggang vom Lehrstuhl am Ball und unterstützte mich, u.a. durch regelmäßiges Nachfragen, weiter dabei die Dissertation abzuschließen.

Meinen Kollegen am Lehrstuhl danke ich für die regen Diskussionen, dem geselligen Austausch beim Mittagessen oder Kaffeetrinken. Eileen, Lukas, Anderl, Johannes und Gregor danke ich für die Unterstützung bei der Dissertation – durch Korrekturlesen, Durchführen von REM-Aufnahmen oder geführte Diskussionen.

Ebenso möchte ich meinem ehemaligen Vorgesetzten und Mentor Christian Dallmayr sowie meiner FiF Seminarkollegin Sabine Fiolka danken, die durch ihre immer wiederkehrenden Nachfragen auch zum Abschluss meiner Dissertation beigetragen haben. Sandra Donath und Julia Beck danke ich für Ihr Korrekturlesen und ihre konstruktiven Rückmeldungen.

Zum Abschluss danke ich meinem Mann Matthias Patzer dafür, dass er mich immer bestärkt und unterstützt hat – nicht nur beim Fertigstellen der Dissertation, sondern bei jedem der parallellaufenden Abschnitte unseres gemeinsamen Lebens!

18 ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Ferner erkläre ich, dass diese Dissertation nicht bereits an anderer Stelle eingereicht oder von anderer Stelle endgültig abgelehnt wurde. Ich versichere, dass ich weder diese noch eine gleichartige Promotionsprüfung endgültig nicht bestanden habe. Zudem erkläre ich, dass ich weder in der Vergangenheit Hilfe von einem gewerblichen Promotionsberater bzw. -vermittler in Anspruch genommen habe, noch künftig in Anspruch nehmen werde.

19 LEBENS LAUF

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Anja Yvonne Lauterbach Familienstand: verheiratet, 2 Kinder
 Geburtsdaten: 11. März 1981 in Hof, Saale Telefon Mobil: +49 170 3237333
 Anschrift: Egerländerweg 19, 95032 Hof E-Mail: anja.lauterbach@gmx.de

BERUFSERFAHRUNG

- Seit 01/2020 Group Director R&D PMO, Group R&D, Wilo SE
 Aufbau einer gruppenweiten PMO Organisation für Entwicklungs-, Resale & Product Care Projekte
- 01/2018 bis 12/2017 Head of PMO PLE Submersible Pumps (Entwicklungs- & Resale-Projekte) & Head of Business Process Engineering Hof, Wilo SE
- 01/2015 bis 12/2017 Head of Project Management PBU Submersible (Entwicklungs-, Resale- & Lokalisierungsprojekte) & Head of Business Process Engineering Hof (SAP Abteilung inkl. Konfigurationsspezialisten), Wilo SE
- 09/2013 bis 12/2014 Projektmanagerin für Entwicklungs- und Lokalisierungsprojekte PBU Submersible, Wilo SE
- 12/2008 bis 09/2013 Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Universität Bayreuth, Lehrstuhl Biomaterialien (Doktorandin), Etablierung des Proteinreinigungsequipments im größeren Maßstab, Prozessverbesserung und -optimierung der Proteinreinigung, Projektleiterin von Förderprojekten: Herstellung von Filtermaterialien mit künstlicher Spinnenseide, CO₂-Bilanz der Produktion künstlicher Spinnenseide
- 09/2006 bis 11/2008 LSMW GmbH als Ingenieurin Prozesstechnik: Planung von Anlagen in Bereich Downstream Processing, Layout-Studien, Entwicklung und Betreuung von Prozessfließbild und Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema, Koordination verschiedener Gewerke und Lieferanten, Kostenabschätzungen, Wirtschaftlichkeitsberechnungen, Erstellen von Ausschreibungsunterlagen, Angebotsvergleich und -auswertung

STUDIUM

- Seit 12/2008 Promotion am Lehrstuhl Biomaterialien, Universität Bayreuth
 Thema: Rekombinanten Spinnenseide als nachhaltiges Biomaterial – Prozessanalyse und Bewertung anhand eines bio-inspirierten Staubbeutel
- 31.08.2008 Master of Business and Engineering (Note: 1,9)
 Master-Thesis: Betriebswirtschaftlicher Vergleich von Disposables und Edelstahl-Anlagen
- 09/2006 bis 08/2008 Master of Business and Engineering (MBE), Steinbeis Hochschule Hochschule Berlin (berufsbegleitend) mit Besuch von Kelley School of Business, Bloomington/Indiana University (USA), Kitakyushu University (Japan), Kyushu University (Japan), Jönköping International Business School (Schweden)
- 09.06.2006 Diplom-Ingenieur (Note: 1,7), Diplomarbeit: Entwicklung eines Keramikchips für die Kapillarelektrophorese mit elektrochemischer Detektion (Note: 1,3)

10/2000 bis 06/2006 Umwelt- und Bioingenieurwissenschaften (Werkstoff- und Verfahrenstechnik), Universität Bayreuth
Zweig: Bioingenieurwissenschaften
Vertiefung: Bioverfahrenstechnik

PRAKTIKA

05/2003 bis 10/2003 Praktikum im Bereich Material Science bei der Firma ICI in Middlesbrough, England: Evaluierung von Tests zur Messung der Kratzfestigkeit von Kunststoffen

02/2003 bis 04/2003 Praktikum im Bereich Bioverfahrenstechnik bei der Firma Bayer AG in Wuppertal: Entwicklung eines Bilderkennungsalgorithmus zur Zellzahlbestimmung bei der Fermentation

08/2000 bis 10/2000 Praktikum bei der Firma Schmidt AG in Beilngries (Maschinenbau): Abteilungen Kostenrechnung, Qualitätssicherung, Fertigung, 3-wöchige Teilnahme am Grundkurs Metall der Schlosserlehre

SCHULBILDUNG

09/1991 bis 06/2000 Schillergymnasium Hof
Schulabschluss: Allgemeine Hochschulreife (Note: 2,1)
davon 11. Schuljahr in Frankreich – 11/1997 bis 06/1998
Collège Lycée St. Yrieix La Perche (Frankreich, Première scientifique)

WEITERBILDUNG

10/2015 bis 12/2017 Frauen in Führungspositionen (bayme): Überbetriebliches Führungstraining für potentielle Nachwuchsführungskräfte in der M&E Branche

24.-27.10.2017 Project Management Advanced – PMI Modules 1+2 (integrata)

08.08.2017 Agiles Mindeset & Scrum (wibas)

17./18.03.2016 Training Six Sigma Projekt Champignon (SSI)

16./17.11.2015 Multiprojektmanagement effektiv einführen (VDI)

06.11.2015 Project-Excellence startet in der Geschäftsführung (ZfU)

29.10.2015 Workshop Interkulturelles Training China/Indien (assist)

16./17.06.2015 Entwickeln von Hochleistungsteams (integrata)

19./20.05.2015 Konflikte erfolgreich managen (integrata)

04./05.05.2015 Multiprojektmanagement – Erfolgreiche Planung und Steuerung parallel- laufender Projekte (Otti)

08.-10.04.2014 Projektmanagement Basic – Grundlagen auf PMI Basis (integrata)

ALLGEMEINE KENNTNISSE

Fremdsprachen	Englisch: verhandlungssicher Französisch: sehr gute Kenntnisse Spanisch: erweiterte Kenntnisse
Soft Skills	strukturiert, analytisch, organisiert, loyal, integer, zuverlässig, sachlich, ausgeglichen