

# Techno-ökonomische Analyse der Torrefizierung von Biomasse sowie auf Torrefizierung basierender Versorgungsketten

## DIPLOMARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

## Diplom-Ingenieur/in

im Rahmen des Studiums

## Wirtschaftsingenieurwesen Informatik

eingereicht von

**Dieter Eidler**

Matrikelnummer 0203723

an der

Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien

Betreuung

Betreuer: Univ.Prof. Dr.Dipl.Ing. Reinhard Haas

Mitwirkung: Dipl.-Ing. Dr. Lukas Kranzl

Mag. Fabian Schipfer

Wien, 20.02.2014

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift Verfasser)

\_\_\_\_\_  
(Unterschrift Betreuer)



Dieter Eidler  
Florianigasse 6  
2851 Krumbach

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

---

(Ort, Datum)

---

(Unterschrift Verfasser)



---

## Kurzfassung

Biomasse bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und den CO<sup>2</sup> Ausstoß zu reduzieren. Länder mit geringen Waldvorkommen, sind allerdings von Importen abhängig, was durch lange Transportdistanzen ökonomisch und ökologisch zu Problemen führen kann. Ziel dieser Arbeit ist die Wirtschaftlichkeit und Einsatzmöglichkeiten von Torrefizierungskonzepten zu analysieren.

Torrefizierung bezeichnet einen thermischen Vorbehandlungsprozess von Biomasse bei Temperaturen zwischen 200-300°C, bei dem diese durch anschließende Verarbeitung zu Pellets (sogenannte TOP-Pellets) oder Briketts eine wesentlich höhere volumen- und massebezogene Energiedichte aufweist und somit die Energiebereitstellungseffizienz erhöhen soll.

Basierend auf Daten der Literatur wurde die Wirtschaftlichkeit von Torrefizierung und anschließender Pelletierung von holzartiger Biomasse im Zuge von Biomasseversorgungsketten unter verschiedenen Rahmenbedingungen bewertet und mit konventioneller Pelletierung verglichen. Für die Berechnung wurde ein Softwaretool implementiert.

Für die Berechnungen wurden Kanada, Lateinamerika und Skandinavien als Exportländer sowie die Niederlande als Importland für Biomasse definiert.

Für die betrachteten Transportdistanzen sind TOP-Pellets nie kostengünstiger als herkömmliche Pellets. Dies liegt im Masseverlust bei TOP begründet. Nur bei der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial welche eine hohe Energiedichte aufweisen oder der Verarbeitung von composite residue logs im Holzschlägerungsgebiet (kürzeste Transportdistanz des Rohmaterials) sind die Kosten von TOP-Pellets äquivalent zu jenen von herkömmlichen Pellets.

Sollte aufgrund technologischer Restriktionen nur eine geringere Energiedichte erzielbar sein, sind die Biomasseversorgungskettenkosten für TOP-Pellets wesentlich höher, als jene für herkömmliche Pellets. Die Realisierung hoher Energiedichten durch diese erst im Demonstrationsstadium befindliche Technologie ist daher von hoher Bedeutung.

Wenn Biomasse ohne Verarbeitung über große Wegstrecken (über 1.000km) transportiert wird, erhält man lediglich eine Energiebereitstellungseffizienz von 72,6 Prozent bis 76,7 Prozent.

Aus ökologischer Sicht sind TOP-Pellets (bei der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial) aus Skandinavien jenen aus Kanada bzw. Lateinamerika

---

vorzuziehen, da diese eine Energiebereitstellungseffizienz von bis zu 94,6 Prozent aufweisen.

Für die untersuchten Fälle sind TOP-Pellets hinsichtlich der Energiebereitstellungseffizienz in fast allen Fällen zu empfehlen. Diese Technologie könnte Biomasseversorgungsketten ökologischer gestalten und somit die ökologische Attraktivität von Biomassebrennstoffen gegenüber fossilen Energieträgern erhöhen.

---

## Abstract

Biomass offers the possibility to reduce the dependency on fossil fuels and CO<sup>2</sup> emissions. Countries with low forest resources are dependent on imports, which can economically and ecologically cause problems due to long transport distances. The aim of this work is to analyze the efficiency and capabilities of torrefication concepts. Torrefication denotes a thermal pretreatment process of biomass at temperatures between 200-300°C, where these by subsequent processing into pellets (so called TOP-pellets) or briquettes having a substantially higher volume- and mass energy density and therefore to increase the energy provision efficiency.

Based on data from literature, the efficiency of torrefication and subsequent pelleting of woody biomass was evaluated in the context of biomass supply chains under different conditions and compared with conventional pelleting. For calculation a software tool has been implemented.

For calculations Canada, Latin America and Scandinavia were defined as exporting countries and the Netherland as the country of import for biomass.

For the considered transport distances TOP pellets in terms of cost are never cheaper than conventional pellets. This is due to the small loss in TOP. Only when using logs as a raw material having a high energy density or the processing of composite residue logs in wood felling area (shortest transport distance of raw material), the cost of TOP pellets equivalent to those of conventional pellets. The realization of high energy densities by these only in the demonstration stage technology situated technology is therefore of great importance.

If biomass is transported without processing over large distances (above 1.000km) only energy provision efficiency of 72,6 percent to 76,7 percent is obtained.

From an ecological point of view, TOP pellets (with the use of logs as raw material) from Scandinavia are preferable those from Canada or Latin America because they have an energy provision efficiency of up to 94,6 percent.

For the investigated cases TOP pellets with regard to the energy provision efficiency are recommended in almost all cases. This technology could make biomass supply chains more ecological and thus increase the ecological attractiveness of biomass fuels compared to fossil fuels.



---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation .....	1
1.1.1	Problemstellung .....	2
1.1.2	State-of-the-art.....	4
1.2	Randbedingungen .....	8
1.3	Wissenschaftliche Methoden.....	9
2	Biomasseversorgungsketten und deren Zwischenschritte.....	10
2.1	Vom Wald zur Vorbehandlung.....	10
2.1.1	Holzstämmе.....	11
2.1.2	CRLs (composite residue logs).....	11
2.1.3	Bündel.....	11
2.1.4	Chips.....	11
2.1.5	Ermittelte Werte .....	12
2.2	Lagerung und Trocknung .....	13
2.2.1	Lagerungsverfahren.....	13
2.2.2	Trocknungsverfahren .....	14
2.3	Zerkleinerung .....	17
2.4	Transport.....	20
2.4.1	LKW .....	20
2.4.2	Zug.....	21
2.4.3	Schiff.....	21
2.5	Pelletierung .....	23
2.6	Torrefizierungstechnologien .....	23
2.6.1	Rotating Drum.....	24
2.6.2	Screw type reactors .....	24
2.6.3	Multiple Hearth Furnace (MHF) or Herreshoff oven.....	25
2.6.4	Torbed reactor .....	26
2.6.5	Moving compact bed.....	26
2.6.6	Belt dryer .....	27
2.6.7	Microwave reactor.....	27
2.6.8	TOP .....	27
2.6.9	Ermittelte Werte für Torrefizierung und Pelletierung .....	29

---

2.7	Energiekosten .....	30
3	Tooldokumentation .....	31
3.1	Softwaretool .....	31
3.2	Datenfile .....	37
3.2.1	Feedstock .....	37
3.2.2	Transporttyp.....	37
3.2.3	Zerkleinern .....	37
3.2.4	Lagerung.....	38
3.2.5	Verarbeitung .....	38
3.2.6	Trocknung .....	38
3.2.7	Torrefizierung.....	38
3.3	Berechnungsschritte .....	39
3.3.1	Feedstock .....	39
3.3.2	Feedstockkosten.....	39
3.3.3	Low heating value berechnen .....	39
3.3.4	Feedstockgesamtenergie.....	39
3.3.5	Lagerkosten .....	40
3.3.6	Feuchtigkeitsverlust durch Lagerung .....	40
3.3.7	Transportkosten .....	41
3.3.8	Transportdauer .....	42
3.3.9	Energieverbrauch bei Transport.....	42
3.3.10	Zerkleinerungskosten .....	43
3.3.11	Energieverbrauch bei Zerkleinerung.....	43
3.3.12	Trocknungskosten .....	43
3.3.13	Energieverbrauch bei Trocknung.....	43
3.3.14	Kosten der Verdichtung .....	43
3.3.15	Energieverbrauch bei Verdichtung .....	44
3.3.16	Masse der Pellets nach Pelletierung .....	44
3.3.17	Energieverbrauch bei Pelletierung.....	44
3.3.18	Endenergiewert der Pellets nach Pelletierung .....	44
3.3.19	Energiedichte der Pellets nach Pelletierung .....	44
3.3.20	Kosten der Pelletierung .....	44
3.3.21	Kosten der Torrefizierung .....	45
3.3.22	Energieverbrauch bei Torrefizierung.....	45

---

3.3.23	Masse der TOP-Pellets nach Torrefizierung .....	45
3.3.24	Endenergiewert der TOP-Pellets nach Torrefizierung .....	45
3.3.25	Energiedichte der TOP-Pellets nach Torrefizierung .....	45
3.3.26	Kettenkostenberechnung pro GJ .....	45
4	Ergebnisse .....	46
4.1	Berechnung mit Variation der TOP- und Pelletierungsstandorte .....	46
4.1.1	Berechnung mittels TOP und Pelletierung im Hafen .....	46
4.1.2	Berechnung mittels TOP und Pelletierung im Holzschlägerungsgebiet .....	56
4.1.3	Berechnung mittels TOP und Pelletierung in den Niederlanden .....	61
4.2	Berechnung mit variierten Transportkosten .....	71
4.2.1	Berechnung mittels veränderter Zugtransportkosten .....	71
4.2.2	Berechnung mittels veränderter LKW-Kosten .....	74
4.2.3	Berechnung mittels unterschiedlicher Schiffstypen von Skandinavien in die Niederlande .....	75
4.3	Berechnung mit unterschiedlichen Biomassearten .....	81
4.3.1	Kostenberechnung mit Holzstämmen .....	82
4.3.2	Energiebereitstellungseffizienz von Biomasseversorgungsketten mit Holzstämmen .....	85
4.3.3	Kostenberechnung mit Bündel .....	87
4.3.4	Energiebereitstellungseffizienz von Biomasseversorgungsketten mit Bündel .....	90
4.4	Veränderte Energiedichte von TOP-Pellets .....	92
4.4.1	Energiebereitstellungseffizienz von TOP-Pellets mit unterschiedlicher Energiedichte .....	95
4.5	Berechnung mittels veränderter TOP Prozesskosten .....	97
4.5.1	Prozesskostenanderung TOP .....	97
4.6	Vergleich der Berechnungen .....	99
4.6.1	Kostenvergleich zwischen Verarbeitung im Ausgangsland und Verarbeitung im Zielland .....	99
4.6.2	Kostenvergleich zwischen Produktion des Endprodukts im Holzschlägerungsgebiet und im Hafen .....	102
4.6.3	Vergleich unterschiedlicher Biomassearten .....	104
4.6.4	Gegenüberstellung von Kosten und Energiebereitstellungseffizienz der Ausgangsversorgungsketten .....	108

---

4.6.5	Vergleich aller Ergebnisse .....	109
5	Schlussfolgerung.....	113
6	Anhang.....	116
6.1	Literaturverzeichnis .....	116
6.2	Diplomarbeitposter.....	120

---

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1 Änderung der Produktionskosten für Holzbrennstoffe in Schweden zwischen 1983 und 2003.....	7
Tabelle 2.1 Auflistung der unterschiedlichen Biomassearten sowie deren Eigenschaften und Kosten.....	12
Tabelle 2.2 Eruierte Werte für Lagerkosten von Biomasse .....	14
Tabelle 2.3 Eruierte Werte für unterschiedliche Trocknungsverfahren sowie deren Ressourcenverbrauch und Kosten .....	15
Tabelle 2.4 Energieverbrauch der Trocknungsverfahren pro Tonne .....	15
Tabelle 2.5 Spezifische Kosten für Trocknungsverfahren (€/t <sub>dm</sub> ) nach Operationszeitfenster .....	16
Tabelle 2.6 Eruierte Werte für Zerkleinerungsverfahren sowie deren Ressourcenverbrauch und Kosten .....	18
Tabelle 2.7 Energieverbrauch der Zerkleinerungsverfahren.....	18
Tabelle 2.8 Dichte der Biomasse nach Zerkleinerung .....	18
Tabelle 2.9 spezifische Kosten für Zerkleinerungsverfahren (€/t <sub>dm</sub> ) .....	19
Tabelle 2.10 primärer spezifischer Energieverbrauch für die Zerkleinerung von Biomasse für drei Zerkleinerungsverfahren.....	19
Tabelle 2.11 Eruierte Werte für LKW sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten .....	20
Tabelle 2.12 Eruierte Werte für Zug sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten .....	21
Tabelle 2.13 Eruierte Werte für Schiff sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten .....	22
Tabelle 2.14 Eruierte Werte für Torrefizierung, TOP und Pelletierung .....	29
Tabelle 2.15 Eruierte Werte für Energiekosten.....	30
Tabelle 4.1 Definierte Ausgangsversorgungsketten .....	46
Tabelle 4.2 Angenommene Kosten, Kapazitäten und Energiedichte für die Versorgungsketten .....	47
Tabelle 4.3 Akkumulierte Kosten der Ausgangsversorgungsketten in €/GJ .....	50
Tabelle 4.4 Einzelkosten der drei Ausgangsversorgungsketten in €/GJ.....	50
Tabelle 4.5 Einzelkosten der Ausgangsversorgungsketten in Prozent.....	52

---

Tabelle 4.6 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Ausgangsversorgungsketten in Prozent .....	54
Tabelle 4.7 Benötigte Energie für jeden Versorgungskettenschritt der Ausgangsversorgungsketten in Prozent .....	54
Tabelle 4.8 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet .....	57
Tabelle 4.9 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet .....	58
Tabelle 4.10 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet .....	58
Tabelle 4.11 Prozentueller Energiewert des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet .....	60
Tabelle 4.12 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	62
Tabelle 4.13 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	63
Tabelle 4.14 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	63
Tabelle 4.15 Prozentuelle Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden ...	65
Tabelle 4.16 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	67
Tabelle 4.17 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	67
Tabelle 4.18 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit identischen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden.....	68
Tabelle 4.19 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent mit identischen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	70
Tabelle 4.20 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport .....	72
Tabelle 4.21 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport.....	72

---

Tabelle 4.22 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport .....	73
Tabelle 4.23 Auswirkungen bezüglich einer Erhöhung der LKW-Kosten auf die Versorgungskette von Kanada in die Niederlande.....	74
Tabelle 4.24 Akkumulierte Kosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	76
Tabelle 4.25 Einzelkosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	77
Tabelle 4.26 Einzelkosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in Prozent mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	77
Tabelle 4.27 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	80
Tabelle 4.28 Verwendete Biomassearten .....	81
Tabelle 4.29 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial.....	83
Tabelle 4.30 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial. ....	83
Tabelle 4.31 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial.....	84
Tabelle 4.32 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial.....	86
Tabelle 4.33 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Bündel als Ausgangsmaterial. ....	88
Tabelle 4.34 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Bündel als Ausgangsmaterial. ....	88
Tabelle 4.35 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Bündel als Ausgangsmaterial.....	89
Tabelle 4.36 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit Bündel als Ausgangsmaterial .....	91
Tabelle 4.37 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderter Energiedichte für TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande .....	93

---

Tabelle 4.38 Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Energiedichten der TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande.....	94
Tabelle 4.39 Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit veränderter Energiedichte torrefizierter Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande .....	94
Tabelle 4.40 Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit unterschiedlichen Energiedichten der TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande.....	96
Tabelle 4.41 Prozentuale Änderung der TOP-Prozesskosten und deren Auswirkung auf die Gesamtkosten des Endprodukts.....	98
Tabelle 4.42 Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Verarbeitung in den Niederlanden und in den Ursprungsländern .....	101
Tabelle 4.43 Endkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts für die Verarbeitung im Hafen und im Holzschlängerungsgebiet.....	103
Tabelle 4.44 Kostenvergleich der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien. ....	105
Tabelle 4.45 Prozentualer Vergleich der Kosten von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien zwischen dem günstigsten und dem teuersten Endprodukt. ....	106
Tabelle 4.46 Prozentueller Energiewert des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien in Prozent .....	107
Tabelle 4.47 Kosten und Energiebereitstellungseffizienz der Ausgangsversorgungsketten .....	108
Tabelle 4.48 Differenzbeträge von Energiebereitstellungseffizienz und Kosten der Ausgangsversorgungsketten von TOP-Pellets gegenüber herkömmlichen Pellets	108

---

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1 Softwaretoolscreenshot.....	31
Abb. 3.2 Klassendiagramm des Tools .....	32
Abb. 3.3 Erster Versorgungskettenschritt im Tool .....	32
Abb. 3.4 Zweiter Versorgungskettenschritt im Tool .....	33
Abb. 3.5 Dritter Versorgungskettenschritt im Tool .....	33
Abb. 3.6 Vierter Versorgungskettenschritt im Tool .....	34
Abb. 3.7 Fünfter Versorgungskettenschritt im Tool.....	35
Abb. 3.8 Sechster Versorgungskettenschritt im Tool.....	35
Abb. 3.9 Fehlermeldung im Tool.....	36
Abb. 4.1 Schiffssroute von Westkanada in die Niederlande von <a href="http://www.searates.com/reference/portdistance/">http://www.searates.com/reference/portdistance/</a> .....	47
Abb. 4.2 Kostenvergleich von Biomasse für die 3 Ausgangsversorgungsketten in die Niederlande .....	48
Abb. 4.3 Kettenkostenvergleich von Biomasse für 3 Ausgangsversorgungsketten in die Niederlande .....	49
Abb. 4.4 Einzelkosten der Ausgangsversorgungsketten in Prozent .....	51
Abb. 4.5 Energiebedarf der 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit Verarbeitung im Hafen .....	53
Abb. 4.6 Kettenkostenvergleich von Biomasse in die Niederlande mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet .....	56
Abb. 4.7 Energiebereitstellungseffizienz der 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet .....	59
Abb. 4.8 Kettenkostenvergleich von Biomasse für 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	61
Abb. 4.9 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	64
Abb. 4.10 Kettenkostenvergleich für Biomasse für 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden .....	66
Abb. 4.11 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit identischen Schiffstypen .....	69

---

Abb. 4.12 Kettenkostenvergleich für Biomasse in die Niederlande mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport .....	71
Abb. 4.13 Kettenkostenvergleich für veränderte LKW-Preise für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande .....	74
Abb. 4.14 Kettenkostenvergleich für Biomasse für Versorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	75
Abb. 4.15 Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen .....	79
Abb. 4.16 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Holzstämmen. ....	82
Abb. 4.17 Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit Holzstämmen	85
Abb. 4.18 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Bündel .....	87
Abb. 4.19 Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit Bündel .....	90
Abb. 4.20 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit veränderter Energiedichte für TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande .....	92
Abb. 4.21 Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit veränderter Energiedichte torrefizierter Pellets.....	95
Abb. 4.22 grafische Darstellung der prozentualen Änderung der TOP-Prozesskosten und deren Auswirkungen auf die Kosten des Endprodukts. ....	97
Abb. 4.23 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Verarbeitung im Ausgangsland und Verarbeitung im Zielland .....	99
Abb. 4.24 Darstellung der Mehrkosten für Pelletierung bzw. TOP von Versorgungsketten mit Verarbeitung im Zielland gegenüber der Verarbeitung im Ausgangsland in Prozent.....	100
Abb. 4.25 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Endproduktherstellungsorten.....	102
Abb. 4.26 Kostenänderung bei Verarbeitung im Hafen gegenüber der Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet.....	103
Abb. 4.27 Kostenvergleich von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien .....	104
Abb. 4.28 Kettenkosten aller berechneten Varianten im direkten Vergleich .....	109
Abb. 4.29 Energiebereitstellungseffizienz aller berechneten Varianten im direkten Vergleich.....	110
Abb. 4.30 Top 3 der günstigsten und teuersten berechneten Varianten.....	111

---

Abb. 4.31 Top 3 der höchsten und niedrigsten Energiebereitstellungseffizienz aller berechneten Varianten ohne Verringerung der Energiedichte von TOP-Pellets.....	112
Abb. 5.1 Energiebereitstellungseffizienz und Kosten aller berechneten Varianten im direkten Vergleich.....	114

---

## Abkürzungsverzeichnis

€	Euro
D	Dauer der Lagerung
$E_e$	elektrischer Energiewert
$E_f$	fossiler Energiewert
$E_P$	Energiewert der Pellets
$E_{TP}$	Energiewert TOP-Pellets
$E_T$	Energieverbrauch für LKW und Schiff
$E_{TO}$	Energieverbrauch Torrefizierung
$E_{TR}$	Energieverbrauch bei Trocknung
$E_{TZ}$	Energieverbrauch für Zug
$E_{VE}$	Energieverbrauch bei Verdichtung
$E_Z$	Energieverbrauch bei Zerkleinerung
$F_{mr}$	Faktor der Massenreduzierung
$F_{nP}$	Feuchte nach Pelletierung
$FG_{nL}$	Feuchtegehalt nach Lagerung
$FG_{vL}$	Feuchtegehalt vor Lagerung
$FV_M$	Feuchteverlust pro Monat
$GJ_{HHV}$	Gigajoule- High Heating Value
$GJ_{prim}$	Gigajoule Primärenergie
h	Stunde
HHV	High heating value
K	Versorgungskettenkosten
$K_{BE}$	Kosten für Be- und Entladevorgang
$K_{end}$	Gesamtkosten der Versorgungskette
$K_F$	Feedstockkosten
$K_{Fm}$	Kosten pro Tonne Feedstock
kg	Kilogramm
$K_{kW}$	Kosten pro kWh
$K_L$	Lagerkosten
$K_{LJ}$	Lagerkosten pro m <sup>3</sup> und Jahr
$K_{LV}$	Kosten für einen Ladevorgang
km	Kilometer
$K_S$	Kosten pro km

---

$K_T$	Transportkosten
$K_{TR}$	Trocknungskosten
$K_{TO}$	Torrefizierungskosten
$K_{Tt}$	Kosten pro Tonne Torrefizierung
$K_{TRt}$	Trocknungskosten pro Tonne
$K_{TZ}$	Transportkosten für Zug
$K_V$	Verdichtungskosten
$K_{Vt}$	Verdichtungskosten pro Tonne
$kW_e$	Kilowatt elektrisch
$kWh$	Kilowattstunde
$K_P$	Pelletierungskosten
$K_{Pt}$	Pelletierungskosten pro Tonne
$K_T$	Torrefizierungskosten
$K_{Tt}$	Torrefizierungskosten pro Tonne
$K_Z$	Zerkleinerungskosten
$K_{Zt}$	Zerkleinerungskosten pro Tonne
LHV	Low heating value
$l_{km}$	Transportdistanz
$m^3$	Kubikmeter
$MJ_{HHV}$	Megajoule- High Heating Value
$m_{nL}$	Gesamtgewicht nach Lagerung
$m_t$	Masse des Feedstocks in Tonnen
$m_T$	Trockenmasse
$m_{nP}$	Masse nach Pelletierung
$m_{WnL}$	Masse des Wassers nach Lagerung
$m_{WvL}$	Masse des Wassers vor Lagerung
$MW_{th}$	Megawatt thermisch
$s_T$	Wegstrecke
$t$	Tonne
$T_A$	Anzahl der benötigten Transportmittel
$T_{Am}$	Anzahl der Transportmittel anhand des Gewichts
$T_{AV}$	Anzahl der Transportmittel anhand des Volumens
TOP	Torrefizierung und Pelettierung
$t_{fW}$	Tonne Frischgewicht

$t_T$	Gesamttransportdauer
$t_{TBELZ}$	Be- und Entladegeschwindigkeit für LKW und Zug
$t_{TBES}$	Be- und Entladegeschwindigkeit für Schiff
$t_{TF}$	Transportdauer
$V$	Volumen des Feedstocks
$v_{BE}$	Be- und Entladegeschwindigkeit
$V_{end}$	Endvolumen
$v_T$	Durchschnittsgeschwindigkeit
$V_T$	Volumenkapazität des Transportmittels
$\rho_P$	Energiedichte von Pellets
$\rho_{TP}$	Energiedichte von TOP-Pellets

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die EU hat sich im Dezember 2008 auf Richtlinien und ein Zielpaket betreffend des Klimaschutzes bis 2020 geeinigt. Demnach soll bis 2020 der erneuerbare Energieanteil auf 20% des Gesamtenergieverbrauchs in der EU steigen und die Treibhausgasemissionen um 20% sinken während Maßnahmen zur 20% Steigerung der Energieeffizienz getroffen werden. (vgl. [http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm), Abgerufen am 26.08.2013)

Zu den erneuerbaren Energieträgern zählen:

- Windenergie
- Solarwärme
- Wasserkraft und Gezeiten
- Erdwärme
- Biomasse

Um diese Ziele zu erreichen, ist ein vermehrter Einsatz von erneuerbaren Rohstoffen von Biomasse unumgänglich.

Vor allem Länder mit wenigen Waldflächen, benötigen importierte Biomasse um den Bedarf an Energie decken zu können. Allerdings verursacht der Import dieses Rohstoffs Kosten und Abgase. Um die Kosten optimieren und die Abgase reduzieren zu können, ist es notwendig, das Ausgangsprodukt vor dem Transport zu verarbeiten. Bisher wird Holz als Rohstoff und Pellets als fertiges Produkt transportiert. Eine neue Technologie namens Torrefizierung, ermöglicht eine Erhöhung der Energiedichte des Endprodukts. Bei dieser wird die getrocknete Biomasse für eine gewisse Zeitspanne auf 200-300°C erhitzt. Wenn torrefizierte Pellets produziert werden, spricht man von TOP (Torrifizierung und Pelletierung). Somit ist TOP ein Pelletisierungsprozess, bei dem die Trocknung und Zerkleinerung mit einem Torrefizierungsschritt erweitert wird.

Im Gegensatz zur reinen Pelletierung wird die Biomasse getrocknet, torrefiziert, zerkleinert, gepresst und abgekühlt. Dadurch erhält man torrefizierte Pellets. (vgl. Bergman, 2005, S. 13ff).

Aufgrund der erhöhten Energiedichte und des reduzierten Volumens wird erwartet, dass TOP-Pellets gegenüber herkömmlichen Pellets hinsichtlich der Kosten und

---

Energiebereitstellungseffizienz innerhalb einer Biomasseversorgungskette effizienter sind und somit einen Wettbewerbsvorteil aufweisen.

Die Biomasseversorgungsketten in dieser Arbeit sind klar abgegrenzt. Sie beginnen mit dem Einkauf der Biomasse und enden beim Endverbraucher. Das Ziel dieser Arbeit ist, die Wirtschaftlichkeit und Einsatzmöglichkeiten von Torrefizierungskonzepten im Bezug auf die gesamte Biomasseversorgungskette zu analysieren. Basierend auf Daten der Literatur werden die Wirtschaftlichkeit von Biomassetorrefizierung von holzartiger Biomasse unter verschiedenen Rahmenbedingungen bewertet und mit anderen Biomassevorbehandlungstechnologien wie der Pelletierung verglichen. Daten in der Literatur werden verglichen und die Aussichten für technologische Verbesserungen diskutiert.

### 1.1.1 Problemstellung

Allgemein besteht noch immer eine hohe Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen.

Im Jahr 2011 wurden allein in der EU 53,8 Prozent der benötigten Energie importiert. Österreich hat im selben Jahr 69,3 Prozent der benötigten Energie importiert. (vgl. „Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table“, 2013)

Erneuerbare Energieträger helfen, diese Abhängigkeit und den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu reduzieren. Allerdings weist diese Form der Energiegewinnung Probleme auf. Vor allem die zeitliche Verfügbarkeit stellt eine große Hürde dar. So kann Windenergie nur bei Wind und Solarwärme nur bei ausreichend Sonnenlicht gewonnen werden. Biomasse hingegen hat den Vorteil, daß die Energie im Holz gespeichert ist und diese somit nach dem Fällen der Bäume bei Bedarf genutzt werden kann. Hierzu ist aber eine an den Bedarf ausgerichtete Menge notwendig, um die Versorgung von z.B. Kraftwerken das ganze Jahr über zu sichern.

„The period when these biomass types are available is very limited and is determined by the crop harvesting period, the weather conditions and the need to replant the fields. Since most of the biomass-to-energy applications to date concern single biomass use, there is a need of storing very large amounts of biomass for a significant time period, if year-round operation of the power plant is desired. The limited time frame for collecting a large amount of biomass leads also to significant seasonal need of resources, both equipment and workforce.“ (Rentizelas, Tolis, & Tatsiopoulou, 2009, S. 3)

---

Eine Erhöhung des Biomasseanteils kann somit zur Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und gleichzeitig zu einer erhöhten Versorgungssicherheit beitragen.

Mit steigender Nachfrage nach Biomasse in Europa (und anderen Regionen der Welt) und die anhaltende Nutzung von heimischen Biomasse-Ressourcen, müssen Technologien zur Vorbehandlung von Biomasse, die einen internationalen Biomassehandel möglich machen würden, größere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Besonders Länder mit wenig Forstflächen stehen dem Problem gegenüber, daß sie von Biomasseimporten abhängig sind. „Pellets are now being imported to Europe long distances—from the Canadian west coast through the Panama Canal, from the U.S. South and, at times, from as far away as Australia and South Africa. While Europe has plans to increase the supply of biomass locally, it is acknowledged that imports will be necessary in order to achieve increasing renewable energy targets in the future.“(Deutmeyer, S. 6)

Vor allem Großbritannien, Belgien und die Niederlande sind auf Importe von Pellets angewiesen. Diese werden unter anderem für die Zufeuerung in Kohlekraftwerken benötigt. Diese Märkte sind sehr stark gewachsen. Z.B. importierte Belgien im Jahr 2004 80.000t und Stieg auf 600.000t im Jahr 2005. (Martin Junginger u. a., 2008, S. 723)

Beim Transport von Biomasse werden in dieser Arbeit zwei wichtige Faktoren beachtet:

1. Kosten
2. Energiebereitstellungseffizienz

Wenn die Kosten für die importierte Biomasse zu hoch sind, wird diese Form der Energiegewinnung nicht akzeptiert und es werden andere Energieformen genutzt. Für exportierende Länder von Biomasse bedeutet dies vor allem auf die Planung der Transportlogistik bedacht zu nehmen.

“Still developing the required logistics is seen as one of the key challenges to further expand the international pellet trade, especially from the exporting countries.” (Martin Junginger u. a., 2008, S. 724)

Erwirkt die Torrefizierung von Biomasse hinsichtlich der gesamten Wertschöpfungskette eine Kostenersparnis, oder weist dieses Verfahren Mehrkosten auf?

---

Ist die Energiebereitstellungseffizienz zu niedrig, hat dies zwar keine direkten Auswirkungen auf die Kosten, jedoch könnte hier die Energiebilanz negativ ausfallen und somit die Umwelt belasten. Die Energiebereitstellungseffizienz bemisst den Energiewert, den das Produkt am Ende der Biomasseversorgungskette aufweist, abzüglich der Energie, welche während des Transports aufgewendet wurde. Deshalb ist es wichtig die Qualität und die Eigenschaften von Biomasse für den Langstreckentransport zu verbessern. Vor allem die Energiedichte spielt hier eine wesentliche Rolle. Ist z.B. zu viel Wasser in der Biomasse vorhanden, belastet dies die Energiebereitstellungseffizienz und die Kosten. Es wird nicht benötigtes Volumen und Gewicht transportiert, was zu einer größeren Anzahl an Transportmittel und Lagerplätzen führt.

Die zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautet daher:

Erwirkt die Torrefizierung von Biomasse hinsichtlich der gesamten Wertschöpfungskette eine verbesserte Energiebereitstellungseffizienz?

### 1.1.2 State-of-the-art

Bis dato ist nur sehr wenig Literatur über torrefizierte Biomasse vorhanden. Die bisherige Forschung konzentriert sich auf die Analyse von Biomasseversorgungsketten, von der Produktion über die Vorbehandlung bis zum Endverbraucher, inklusive der Logistik als Verbindungsglied. Derzeit werden unterschiedliche bestehende Reaktortypen bezüglich ihrer Eignung zur Torrefizierung getestet. Zusätzlich zu diesen Reaktortypen werden neue, speziell für den Torrefizierungsprozess entwickelte Reaktoren untersucht.

„The application of torrefaction as a new pre-treatment technology is only interesting when it leads to a reduction of costs of the overall biomass-to-energy production chain. Especially when considering that torrefaction technology yet has not reached a commercial status.“ (P. C. Bergman & Kiel, 2005, S. 3)

Erwünschte Produktqualitäten von torrefizierter Biomasse wie volumetrischer Energieinhalt, Zerkleinerbarkeit und Hydrophobie steigen mit Erhöhung der Verfahrenstemperaturen, während die Masseausbeute von 85% bei ca. 240°C sich auf fast 50% bei 300°C verringert. Gleichzeitig verringert sich der Energieertrag von 90% auf 60% bezogen auf trockenes Material. Abhängig von technischen und ökonomischen Parametern der finalen Biomasse-Energie Wertschöpfungskette,

---

werden verschiedene Torrefizierungssysteme und Torrefizierungstechnologien nötig sein, um optimale wirtschaftliche Ergebnisse zu erzielen. (Deutmeyer, 2012, S. 9)

Zu diesem Zweck wurden verschiedene bestehende Reaktortypen auf ihre Eignung bezüglich des Torrefizierungsprozesses untersucht. Diese Untersuchung inkludiert ovens, rotary-drum dryers, multiple-hearth furnaces, torbed reactors, und indirectly, heated screw reactors. All diese Reaktoren müssen umgebaut werden, damit eine gasdichte Reaktionskammer vorhanden ist, welche die Reaktionen während des Prozesses verkraftet und die emittierenden Gase, die während des Prozesses entstehen energetisch nutzen und somit die Kosten senken kann. Zusätzlich zu den Umbauten werden neu designte Reaktortypen getestet, welche speziell auf den Torrefizierungsprozess zugeschnitten sind. Die beiden wichtigsten sind hierbei compact moving bed und fluidized moving bed Konzepte. (Deutmeyer, 2012, S. 9)

Vor der Erhitzung wird das Holz zerkleinert. Je nach gewähltem Reaktor wird eine bestimmte Holzpartikelgröße benötigt. Des Weiteren müssen Temperatur und Verweildauer auf diese abgestimmt sein.

“In order to produce a homogenous product, each torrefaction process has to make sure that feedstock particle size varies little in width and individual particles experience the same temperature curve and residence time. With increasing particle size and particle-size distribution, the needed residence time generally increases.“ (Deutmeyer, 2012, S. 10)

Die Torrefizierung von Biomasse erwirkt einen erhöhten Brennwert und erleichtert somit den Transport und die weitere Verarbeitung. „Torrefaction of clean wood chips and logging residues significantly improved the heating value compared to that of untreated biomass.“ (Phanphanich & Mani, 2011, S. 1252)

„... intercontinenta bioenergy transport is economically and energetically feasible, when associated pre-treatment stages are considered in the chain.“ (Uslu, Faaij, & Bergman, 2008, S. 1222)

Durch die Globalisierung verstärkt sich der internationale Transport von Gütern immer mehr. Der Verkehr wird unter anderem auch für die Klimaerwärmung verantwortlich gemacht. Beim Transport von Biomasse über lange Distanzen

---

(>5000km) könnte die aufgewendete Energie für den Transport, den Energiewert der Biomasse übersteigen. Der Transport würde eine negative Energiebilanz aufweisen und anstatt die Umwelt zu entlasten, diese noch zusätzlich schädigen. Somit würde der Vorteil von erneuerbaren Energien verpuffen.

„Bioenergy is traditionally considered as a local energy source. If environmental gains can be made by an increased access from a larger geographical territory, bioenergy can be traded over long distances. A key issue is if long distance transportation of bioenergy is environmentally viable and ecologically sustainable.“(Forsberg, 2000, S. 18)

Eine weitere Gefahr besteht hinsichtlich der Kosten. Wenn die Wälder zu weit von Transportrouten entfernt sind, kann dies die Kosten für Biomasse enorm in die Höhe treiben.

“In Brazil, a considerable amount of planted forests is presently located at places where freight is quite expensive up to maritime ports, mainly because of the high cost of transporting biomass by trucks. Compared with free on board values, prices may increase about 50% in some harbours, and up to a factor of three when transported to Europe.“ (Martin Junginger u. a., 2008, S. 724)

Neuere Studien haben aber bereits erwiesen, dass Langstreckentransporte von Biomasse ökonomisch und ökologisch gewinnbringend sein können. Eine Begründung dafür könnten die sinkenden Kosten für Biomasseproduktion während der letzten Jahrzehnte sein. Einen interessanten Vergleich über die Veränderung der Produktionskosten von Holzbrennstoffen in Schweden in €/GJ (€/Gigajoule) zwischen 1983 und 2003 findet man in Tabelle 1.1. Hieraus ist ersichtlich, daß die Beförderungskosten mit 58% am stärksten gesunken sind, gefolgt von den Zerkleinerungskosten mit 33%. (vgl. Junginger, Faaij, Björheden, & Turkenburg, 2005, S. 408)

“One of the most important barriers in increased biomass utilization in energy supply is the cost of the respective supply chain and the technology to convert biomass into useful forms of energy.“(Rentizelas u. a., 2009, S. 888)

“Biomass can be gathered or produced at large scale against favourable costs, and transportation over long distances should not be considered as an obstacle.“(Hamelinck, Suurs, & Faaij, 2005, S. 132)

**Tabelle 1.1** Änderung der Produktionskosten für Holzbrennstoffe in Schweden zwischen 1983 und 2003

Jahr	Produktionskosten für Holzbrennstoff [€/GJ]		Kostenreduktion [%]
	1983	2003	2003 vs. 1983
Beförderung zum Straßenrand <sup>a)</sup>	1.61 (28.3%)	0.68 (17.7%)	58
Zerkleinern <sup>a)</sup>	1.89 (33.3%)	1.27 (33.0%)	33
Transport <sup>a)</sup>	1.23 (21.6%)	1.04 (27.2%)	15
Holzschlag- gebühren <sup>b)</sup> und andere Kosten <sup>a)</sup>	0.95 (16.7%)	0.85 (22.1%)	10
Gesamt <sup>a)</sup>	5.68 (100%)	3.84 (100%)	32

a) (M. Junginger u. a., 2005, S. 408) die in Klammern stehenden Zahlen sind der relative Anteil an den Gesamtkosten

b) Holzschlaggebühren müssen von der Firma welche das Holz schlägert, an den Waldeigentümer entrichtet werden.

## 1.2 Randbedingungen

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Kostenanalyse der Biomasseversorgungsketten. Es gilt herauszufinden, ob die Torrefizierung von Biomasse, hinsichtlich der gesamten Biomasseversorgungskette eine Kostenersparnis erwirkt, oder ob dieses Verfahren Mehrkosten aufweist. Des Weiteren wird untersucht, ob die Energiebereitstellungseffizienz von Torrefizierungsketten positiv oder negativ ist. Die Energiebereitstellungseffizienz gibt den Energiewert des Endprodukts, im Verhältnis zu der aufgewendeten Energie in der Biomasseversorgungskette an.

Die Systemgrenzen sind einerseits mit dem Kauf der Biomasse im Produktionsgebiet und andererseits mit der Lieferung beim Endkunden definiert. Beim Kauf der Biomasse werden nur der Preis, der Energiegehalt, das Gewicht, der Wassergehalt und die Energiedichte berücksichtigt. Die bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Energieaufwendungen sind sehr schwer zu ermitteln und fließen nicht in die Berechnung mit ein. Ebenso wird der Trockenmasseverlust, welcher aufgrund der großen Anzahl an Einflussfaktoren sehr schwer zu ermitteln ist, in der Berechnung nicht berücksichtigt. Somit werden nur die anfallenden Kosten und die benötigte Energie für den Transport und die Verarbeitung in der Berechnung berücksichtigt.

Die Verarbeitung beim Endkunden hat einen sehr großen Einfluß auf die Energieeffizienz. Dies ist z.B. von der Produktion von Wärme oder Elektrizität abhängig, da die Wärmeproduktion einen wesentlich größeren Wirkungsgrad als die Stromproduktion hat. Somit wird die Verarbeitung beim Endkunden in dieser Arbeit ebenfalls nicht berücksichtigt.

---

## 1.3 Wissenschaftliche Methoden

Basierend auf Daten der Literatur wird die Wirtschaftlichkeit von Torrefizierung von holzartiger Biomasse unter verschiedenen Rahmenbedingungen bewertet und mit anderen Biomassevorbereitungstechnologien wie der Pelletierung verglichen.

Daten aus der Literatur werden herangezogen und die Aussichten auf technologische Verbesserungen diskutiert. Des Weiteren wird ein Softwaretool implementiert, mit welchem man die Biomasserversorgungsketten in einer konsistenten, übersichtlichen Art und Weise darstellen und hinsichtlich Kosten bzw. anderer Kriterien (z.B. Energie- und Treibhausgasbilanzen) analysieren kann.

Schließlich werden exemplarische Fallstudien für Biomasseversorgungsketten von torrefizierter Biomasse entwickelt (z.B. Torrefizierung von Holzresten in Kanada, der Versand nach Europa) und Schlussfolgerungen in Bezug auf vernünftige Einsatzmöglichkeiten abgeleitet.

Um die Berechnungen effizienter und schneller durchführen zu können, wird ein Softwaretool entwickelt. Dieses liest Daten aus einer Datei aus, und ermöglicht die Erstellung unterschiedlicher Biomasseversorgungsketten. Der Benutzer gibt die gewünschten Daten in die Benutzeroberfläche ein und überlässt die Berechnung dem Tool. Die Ergebnisse müssen in weiterer Folge nur mehr vom Benutzer analysiert und ausgewertet werden.

## 2 Biomasseversorgungsketten und deren Zwischenschritte

In dieser Arbeit beginnt die Biomasseversorgungskette mit dem Einkauf der Biomasse im Produktionsgebiet und endet mit der Ablieferung beim Endverbraucher. Je größer die Distanz zwischen Biomasseproduktionsort und dem Endverbraucher ist, desto größer wird der logistische Aufwand und die damit verbundenen Kosten. Eine Möglichkeit die Transportwege kosteneffizienter zu gestalten besteht darin, die Eigenschaften von Biomasse in Vorbehandlungswerken zu verändern. Hierbei müssen allerdings die Kosten für diese Werke beachtet werden.

„As compared to biorefineries and other complex and capital-intensive pretreatment technologies (pyrolysis, gasification, and combustion), locating torrefaction at preprocessing depots will require low capital investment, which facilitates adaptability and reconfiguration for regionally specific resources and management systems.“ (Deutmeyer, 2012, S. 13)

Außer den Kosten, müssen auch die Eigenschaften der behandelten Biomasse berücksichtigt werden, da es bis dato keine Norm für diese gibt. Eine Vereinheitlichung der Norm für Biomasseprodukte wie Pellets und Briketts, würden sowohl dem Biomassehandel, den Produzenten von Biomasseanlagen, als auch den Endkunden, welcher diese Produkte benützt, enorme Vorteile hinsichtlich der Kosten verschaffen.

Für Pellets gibt es keine einheitlichen Standards. Einige Länder wie Österreich oder Deutschland haben eigene Normen, andere wiederum keine. Es gibt aber bereits Initiativen wie CEN/TC 335, welche einen einheitlichen Standard herbeiführen wollen. (vgl. <http://www.biomassenergycentre.org.uk> abgerufen am 27.08.2013)

### 2.1 Vom Wald zur Vorbehandlung

Die Holzproduktion findet vorzugsweise im Winter statt. Durch den gefrorenen Boden ist die Holzschlägerung und der Abtransport einfacher und geht schneller von statten. Des Weiteren ist der Wassergehalt in den Bäumen im Winter geringer, da diese im Herbst beginnen, den Feuchtigkeitsgehalt in ihrem Stamm zu verringern um Frostschäden vorzubeugen.

---

### 2.1.1 Holzstämme

Holzstämme sind das wichtigste Rohprodukt in der Forstindustrie. Diese werden für die verschiedensten Anwendungsmöglichkeiten verwendet. Unter anderem für die Möbel- und Papierindustrie. Der Anwendungsbereich ist sehr stark von der Holzqualität abhängig. Billigere Holzstämme werden auch zur Wärmeproduktion herangezogen.

“Forest residue logs are the middle part (3 m) of the tree stems, that are normally destined for the pulp industry.” (Hamelinck, 2003, S. 32)

### 2.1.2 CRLs (composite residue logs)

CRLs haben in etwa einen Durchmesser von 0,75m und eine Länge von 3m. Sie weisen eine wesentlich höhere Dichte als Bündel auf und können aufgrund ihrer Form wie Holzstämme gehandhabt werden. Beim Transport besteht allerdings die Gefahr, dass sich Holzteile lösen. Dies könnte mit Netzen unterbunden werden. (vgl. Hamelinck, 2003, S. 11)

### 2.1.3 Bündel

Für Bündel werden schnellwachsende Holzsorten verwendet. Diese werden alle 4 Jahre geerntet, wobei nach 25 Jahren der Zyklus endet und der Bestand erneuert werden muß. Die Kultivierung und Ernte ist aufgrund der kleinen Skalierung noch ineffizient und die Preise sind somit relativ hoch. Für die Zukunft werden Produktions- und Effizienzsteigerungen für ausgewählte Holzsorten erwartet. Dies würde einen ähnlichen Preis wie für CRLs bedeuten. (vgl. Hamelinck, 2003, S. 11)

### 2.1.4 Chips

Chips werden durch Zerkleinerung von Holzstämmen, CRLs oder Bündel gewonnen. Diese werden normalerweise direkt im Produktionsgebiet oder beim Endbenutzer produziert und nicht mehr weiterverarbeitet. Sie dienen vornehmlich zur Wärmegewinnung in Fernwärmekraftwerken oder in Privathäusern.

“First residues may be left in piles on the cutover, to dry during the spring and early summer. Eventually, they are forwarded to or close to the roadside, where the residue piles are covered with paperboard to keep the moisture content down. Gradually parts of the pile will be chipped locally, just before transportation.” (Hamelinck u. a., 2005, S. 120)

Chips sind aufgrund ihrer relativ geringen Schüttdichte und ihrer Anfälligkeit auf Schimmel, für den Langstreckentransport weniger interessant. (vgl. Hamelinck, 2003, S. 11)

### 2.1.5 Ermittelte Werte

Für die Berechnung notwendiger Daten werden die in Tabelle 2.1 ermittelten Werte verwendet. Die Kosten sind in €/t<sub>nass</sub> (€/tonne nass) und €/GJ<sub>HHV</sub> (Gigajoule- High Heating Value) angegeben. Die Dichte wird in kg/m<sup>3</sup> angegeben und ist für die Berechnung von immenser Bedeutung. Jedes Transportmittel hat eine maximale Volums- und Gewichtskapazität. Somit entscheidet die Dichte über die benötigte Anzahl der Transportmittel. Die Feuchtigkeit in % gibt über den Wassergehalt im Holz Auskunft.

**Tabelle 2.1** Auflistung der unterschiedlichen Biomassearten sowie deren Eigenschaften und Kosten

Rohstoff	Kosten [€/t <sub>nass</sub> ]	Kosten [€/GJ <sub>HHV</sub> ]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Feuchtigkeit [%]	Energiedichte [GJ <sub>HHV</sub> /t]
Holzstämme Skandinavien <sup>a)</sup>	9,3	0,9	462	50	20,8
Chips Skandinavien <sup>a)</sup>	27,5	2,6	219	50	20,8
CRLs Skandinavien <sup>a)</sup>	17,4	1,5	251	45	20,8
Bündel Skandinavien <sup>a)</sup>	48,5	3,9	160	37	19,5
Bündel Osteuropa <sup>a)</sup>	18,4	1,5	160	37	19,5
Holzstämme Lateinamerika <sup>a)</sup>	10,2-16,8	0,7-1,1	280	20	19,4

a) (Hamelinck u. a., 2005, S. 120)

---

## 2.2 Lagerung und Trocknung

Am Beginn jeder Biomasseversorgungskette wird Biomasse sehr oft während des Winters am Straßenrand gelagert. Hierbei trocknet diese und der Feuchtegehalt verringert sich kostenlos von 50% auf bis zu 30%. Bei zu langer Lagerung beginnt die Biomasse zu verrotten. Kleinere Teile sind hiervon stärker betroffen als Größere. Die Lagerung im Freien kann einen Trockenmasseverlust von bis zu 3% pro Monat verursachen. Dies bedeutet, dass hierbei der Brennwert der Biomasse durch verschiedene Einflussfaktoren wie Feuchtigkeit und Schimmel zunehmend sinkt. Der Trockenmasseverlust ist aufgrund der großen Anzahl an Einflussfaktoren sehr schwer zu ermitteln und fließt nicht in die Berechnung mit ein.

Holzstämme, Chips und Bündel werden generell im Freien gelagert, wobei die Kosten 1,1€/m<sup>3</sup> pro Jahr betragen. Wertvollere Biomasse wie Pellets oder getrocknete Chips, werden in Bunkern zum Preis von 87€/m<sup>3</sup> pro Jahr eingelagert. (vgl. Hamelinck u. a., 2005, S. 121)

### 2.2.1 Lagerungsverfahren

Die Lagerung spielt in allen Biomasseversorgungsketten eine wesentliche Rolle. Durch dies kann die Verfügbarkeit von allen Produkten erhöht und somit der Bedarf gedeckt werden. Die Lagerung sollte aber unter allen Umständen minimiert werden, da hierbei Kapital gebunden wird und Kosten verursacht werden.

„At a number of points in the transport chain it is necessary to create storage possibilities for biofuels. Particularly at points where cargo is transferred between transport modalities of different scales. A large ship can take more than a thousand times as much freight as a road truck. This implies logistic bottlenecks which can only be resolved by providing sufficient storage facilities. Another reason for the necessity of storage facilities is the possible seasonal dependency of biofuel supply. The supply of biomass is often limited to a part of the year, while demand is always up and high capital investment costs call for a continuing supply of feedstock. This asks for a peak production during part of the year, which could stress the logistic capacity of the storage facilities and potentially of the whole chain.“ (Suurs, 2002, S. 38)

Für die Lagerung werden drei Typen ausgewählt und sind in Tabelle 2.2 aufgelistet. Die Kosten werden in €/m<sup>3</sup>J (€/m<sup>3</sup>Jahr) angegeben. Für die Freiluftlagerung wird ein Feuchtigkeitsverlust von 3% pro Monat angenommen.

**Tabelle 2.2** Eruierte Werte für Lagerkosten von Biomasse

	Kosten [€/m <sup>3</sup> J] <sup>a)</sup>	Feuchtigkeitsverlust [%/Monat]
Freiluftlagerung	1,1	3
Bunker	80	-
Silo	9,3	-

a) (Hamelinck u. a., 2005, S. 121)

### 2.2.2 Trocknungsverfahren

Die Trocknung dient der Reduzierung von Feuchtigkeit in der Biomasse. Hierdurch wird die Energiedichte erhöht und somit die Effizienz in der Biomasseversorgungskette gesteigert.

„Different types of dryers are available. The most simple and common technology for biomass drying is the rotary drum dryer (RDD). With this technology the biomass is dried by bringing it in direct contact with hot air or flue gas while rotating it around in a drum. A more recent technology is the fluidised bed dryer (FBD), which uses a continuous flow of gas, flowing through a bed, consisting of biomass particles and inert material like sand. The heated gas enters the bed at the bottom and leaves at the top. A third technology which is even more sophisticated is the recompressive dryer (RD). This machine utilises steam heat without the requirement of an external heat source (Pierik and Curvers, 1995).“ (Suurs, 2002, S. 27)

Für die Berechnung werden die in Tabelle 2.3 angegebenen Trocknungsverfahren ausgewählt. Die Kapazität der verschiedenen Verfahren wird in  $t_{FW}/h$  (tonne Frischgewicht/Stunde) angegeben. Für den Drehtrommeltrockner (Rotary Drum Dryer) und den Fließbettrockner (Fluidised Bed Dryer) wird zur Trocknung Wärme, angegeben als Energieverbrauch-t mit den Einheiten  $MW_{th}$  (Megawatt thermisch) und elektrische Energie, angegeben als Energieverbrauch-e mit den Einheiten  $kW_e$  (Kilowatt elektrisch), benötigt. Der recompressive Trockner benötigt hingegen nur elektrische Energie.

**Tabelle 2.3** Eruierte Werte für unterschiedliche Trocknungsverfahren sowie deren Ressourcenverbrauch und Kosten

Type	Drehtrommeltrockner <sup>a)</sup>	Fließbettrockner <sup>a)</sup>	Recompressive Trockner <sup>a)</sup>
Kapazität [ $t_{fW}/h$ ]	100	14,57	38,2
Energieverbrauch-t [ $MW_{th}$ ]	12,5	4,875	-
Energieverbrauch-e [ $kW_e$ ]	2000	294	3629
Feuchtigkeit nach der Behandlung [%]	7-10	15	?

a) (Suurs, 2002, S. 28)

Aus den in Tabelle 2.3 vorhandenen Werten für Kapazität und Energieverbrauch, erhält man die in Tabelle 2.4 angegebenen Kilowattstunden pro Tonne. Hierbei wird der Energieverbrauch-e durch die Kapazität dividiert. Daraus erhält man den Energieverbrauch-e/t angegeben mit den Einheiten kW/t (Kilowatt/tonne).

**Tabelle 2.4** Energieverbrauch der Trocknungsverfahren pro Tonne

Type	Drehtrommeltrockner	Fließbettrockner	Recompressive Trockner
Energieverbrauch-e/t [ $kW/t$ ]	20	20,18	95

Die Kosten sind vom jeweiligen Trocknungsverfahrenstyp, sowie vom Operationszeitfenster abhängig. Unter dem Operationszeitfenster versteht man die Auslastung, welche eine Anlage innerhalb eines Jahres erfährt. So fallen bei einem sechsmonatigen Betrieb für den Drehtrommeltrockner 6,8€/t und für zwölf Monate nur mehr 3,7€/t an. Somit sinken mit einer höheren Auslastung die Kosten, welche in Tabelle 2.5 aufgelistet sind.

**Tabelle 2.5** Spezifische Kosten für Trockungsverfahren ( $\text{€}/t_{\text{dm}}$ ) nach Operationszeitfenster

Operationszeitfenster	Drehtrommeltrockner <sup>a)</sup> [ $\text{€}/t$ ]	Fließbettrockner <sup>a)</sup> [ $\text{€}/t$ ]	Recompressive Trockner <sup>a)</sup> [ $\text{€}/t$ ]
12 Monate	3,7	10,6	23,8
9 Monate	4,8	12,2	30,2
6 Monate	6,8	15,5	43,1

a) (Suurs, 2002, S. 28)

---

## 2.3 Zerkleinerung

Die Zerkleinerung von Biomasse kann an den unterschiedlichsten Punkten der Biomasseversorgungskette erfolgen. Der Zeitpunkt der Zerkleinerung wird üblicherweise so gewählt, dass zeitlich erst kurz vor der Weiterverarbeitung oder Verbrennung, das Holz in die gewünscht Größe gebracht wird. Werden die kleinen Holzstücke zu lange gelagert, kann dies zu einem enormen Brennwertverlust durch z.B. Feuchtigkeit oder Schimmel führen.

„The logistics chain for the different types of chips starts with the harvesting of the raw material in the forest, before sorting and transport to a forest road. The timber dries naturally, with no additional energy, for approximately one year before chipping. The drying process can take place in the forest, beside the road or in a terminal. The chipping is done using a chipping machine in the forest, by the road (or in a terminal) or at the heating plant if they can provide the space needed. The challenge with respect to logistics lies in where the timber can be stored and where it is chipped, and if it must be handled a number of times while in the terminal. The terminal cost thereby consists of two components in addition to the chipping cost: One component is storage; the other is in connection with loader handling. When the timber is chipped, it is treated as fresh produce. Consequently, chipping is carried out only when a customer is ready to receive the chips.“ (Energidata & Consulting, 2005, S. 36)

Es werden drei verschiedene Zerkleinerungsverfahren ausgewählt welche in Tabelle 2.6 aufgelistet sind. Die Kapazität ist mit den Einheiten  $t_{fw}/h$  (tonne Frischgewicht/Stunde) und der Energieverbrauch-e ist mit der Einheit  $kW_e$  (Kilowatt elektrisch) angegeben.

Die hammermill besteht aus einer drehbaren Welle auf welcher Platten montiert sind. Auf jener sind wiederum bewegliche Messer montiert. Durch Rotation der Welle, hacken diese das Holz in kleine Teile. (vgl. Hightower, 1974, S. 1)

**Tabelle 2.6** Eruierte Werte für Zerkleinerungsverfahren sowie deren Ressourcenverbrauch und Kosten

Type	Roll crusher <sup>a)</sup>	Hammermill <sup>a)</sup>	MP Bolagen <sup>a)</sup>
Kapazität [ $t_{fw}/h$ ]	1-10	25-50	80
Energieverbrauch-e [ $kW_e$ ]	65	240	1320
Investitionskosten [1000€]	137,32	358,22	529,07
Instandhaltung [% invest.]	20	20	20
Lebenszeit [J]	15	15	15

a) (Suurs, 2002, S. 26)

Je nach Zerkleinerungsverfahren, ändert sich der Energieverbrauch-e, der hierfür benötigt wird (siehe Tabelle 2.7).

**Tabelle 2.7** Energieverbrauch der Zerkleinerungsverfahren

Type	Roll crusher <sup>a)</sup>	Hammermill <sup>a)</sup>	MP Bolagen
Energieverbrauch-e/t [ $kW/t$ ]	8,22	3,5	-

a) (Hamelinck u. a., 2005, S. 122)

Durch die Zerkleinerung ändert sich die Dichte des Materials (siehe Tabelle 2.8) welche in den Einheiten  $kg/m^3$  (Kilogramm/Kubikmeter) angegeben ist. Dies hat Auswirkungen auf die Anzahl der benötigten Transportmittel und die Kosten, da diese nur eine begrenzte Gewichts- und Volumenkapazität haben.

**Tabelle 2.8** Dichte der Biomasse nach Zerkleinerung

Type	Roll crusher <sup>a)</sup>	Hammermill <sup>a)</sup>
Dichte [ $kg/m^3$ ]	240	240

a) (Hamelinck u. a., 2005, S. 122)

Je nach Zerkleinerungsverfahren und Operationszeitfenster, entstehen unterschiedliche Kosten welche in den Einheiten €/t<sub>dm</sub> (Euro / tonne Trockenmasse) angegeben sind (siehe Tabelle 2.9).

**Tabelle 2.9** spezifische Kosten für Zerkleinerungsverfahren (€/t<sub>dm</sub>)

Operationszeitfenster	Roll crusher <sup>a)</sup>	Hammermill <sup>a)</sup>	MP Bolagen <sup>a)</sup>
12 Monate	6,5	3,5	2,0
9 Monate	8,7	4,7	2,7
6 Monate	13,0	7,0	4,1

a) (Suurs, 2002, S. 26)

Die Gesamtenergieaufnahme ist von der installierten Kapazität linear abhängig. Somit ist der spezifische Energieverbrauch unabhängig vom Ausmaß der Operation. (vgl. Suurs, 2002, S. 27). Der Primäre Energieverbrauch ist in den Einheiten GJ<sub>prim</sub>/t<sub>dm</sub> (Gigajoule primär/tonne Trockenmasse) in Tabelle 2.10 abgebildet.

**Tabelle 2.10** primärer spezifischer Energieverbrauch für die Zerkleinerung von Biomasse für drei Zerkleinerungsverfahren

Type	Roll crusher <sup>a)</sup>	Hammermill <sup>a)</sup>	MP Bolagen <sup>a)</sup>
Primärer Energieverbrauch (GJ <sub>prim</sub> /t <sub>dm</sub> )	0,18	0,13	0,23

a) (Suurs, 2002, S. 27)

## 2.4 Transport

### 2.4.1 LKW

LKW's werden als flexible Transportmittel für relativ kurze Distanzen über Land benutzt, da mit längeren Strecken die Transportkosten steigen.

„Pellets are transported partly by regular trucks (tipping from the sides or from the back), whereas pellets delivered in bulks are transported in container trucks, where the pellets are blown from the truck into a silo or container at the heating plant. In bulk distribution, possibilities for return transport are limited, but the trucks that are used can also transport animal feed. Consequently, pellet production can be located to those districts where meat and dairy production is extensive.“ (Energidata & Consulting, 2005, S. 39)

Die Größe und Ladekapazität ist hierbei von den länderspezifischen Gesetzen abhängig. Zum Beispiel hat ein schwedischer LKW eine Länge von 24m und ein zulässiges Gesamtgewicht von 60 Tonnen. (vgl. Andersson, 2000, S. 115) Um die Berechnungen in dieser Arbeit zu erleichtern, werden diese mit den in Tabelle 2.11 aufgelisteten Werten durchgeführt. Der Energieverbrauch ist hierbei in MJ<sub>HHV</sub>/km (Megajoule high heating value / Kilometer) angegeben.

**Tabelle 2.11** Eruierte Werte für LKW sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten

	Pellets/Chips/Sägespäne	Stämme/Ballen/lose Reste
Kosten (€/km)	1,1	1,1
Kapazität (t) <sup>a)</sup>	46	40
Kapazität (m <sup>3</sup> ) <sup>a)</sup>	130	130
Energieverbrauch-f (MJ <sub>HHV</sub> /km) <sup>a)</sup>	18,09	18,09
Transportgeschwindigkeit (km/h) <sup>a)</sup>	65	65
Be- bzw. Entladekosten (€/m <sup>3</sup> ) <sup>a)</sup>	0,5	0,5
Be- bzw. Entladezeit (t/h) <sup>a)</sup>	260	260

a) (Hamelinck, 2003, S. 45)

### 2.4.2 Zug

Der Zugtransport ist für den Transport von großen Mengen über Land geeignet. Das größte Problem stellt die Flexibilität dieses Transportmittels dar. Die Anzahl der möglichen Waggons und die Beladung ist sehr stark von der Streckenführung abhängig. Für den Zugtransport werden die in Tabelle 2.12 stehenden Werte verwendet. Im Gegensatz zu Schiff und LKW konnten für die Kosten keine Werte ermittelt werden. Somit werden für diese die in Tabelle 2.12 aufgelistete Formel verwendet.

**Tabelle 2.12** Eruierte Werte für Zug sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten

	Pellets/Chips/Sägespäne	Stämme/Ballen/lose Reste
Kosten (€/km) <sup>a)</sup>	$\frac{8450}{\text{distance (km)}} + 4$	$\frac{8450}{\text{distance (km)}} + 4$
Kapazität (t) <sup>b)</sup>	1000	1000
Kapazität (m <sup>3</sup> ) <sup>b)</sup>	2500	2500
Energieverbrauch-e (kWh/km) <sup>b)</sup>	163	163
Transportgeschwindigkeit (km/h) <sup>b)</sup>	75	75
Be- bzw. Entladekosten (€/m <sup>3</sup> ) <sup>b)</sup>	0,23	0,23
Be- bzw. Entladezeit (t/h) <sup>b)</sup>	240	260

a) (Hamelinck, 2003, S. 46) Zusätzlich zu den Kilometerkosten müssen noch die Elektrizitätskosten addiert werden.

b) (Hamelinck, 2003, S. 46)

### 2.4.3 Schiff

Der Schifftransport wird überwiegend für Langstrecken- und Interkontinentaltransporte verwendet. Die Kosten für Schiffe variieren sehr stark und sind in den letzten Jahren aufgrund der Wirtschaftskrise und der steigenden Anzahl an Schiffen sehr stark gesunken.

“Freight rates in the Panamax segment have been exposed to a long-term downward trend. Clarksons counted 1,632 Panamax bulkers at the beginning of 2010 and during the same period the Baltic Exchange to a \$11,000–\$15,000 corridor. In 2012, this

trend 2,035 ships and the average daily time charter rate of below \$9,000 reached its lowest level since July 2008.” (Loriot, 2012, S. 67)

In Tabelle 2.13 findet man die eruierten Werte, welche für die Berechnung herangezogen werden.

**Tabelle 2.13** Eruierte Werte für Schiff sowie dessen Ressourcenverbrauch und Kosten

	small vessel	Handysize	Supramax	Panamax	Capesize
Kosten (€/day)	10700 <sup>e)</sup>	10300 <sup>a)</sup>	10700 <sup>a)</sup>	10800 <sup>a)</sup>	10300 <sup>a)</sup>
Kapazität (t) <sup>b)</sup>	4000	37000	55000	63000	110000
Kapazität (m <sup>3</sup> ) <sup>b)</sup>	6700	62000 <sup>c)</sup>	92000 <sup>c)</sup>	105000	184000
Energieverbrauch-f (MJ <sub>HHV</sub> /km) <sup>b)</sup>	647	1525 <sup>d)</sup>	1808 <sup>d)</sup>	2517	3312
Transportgeschwindigkeit (km/h) <sup>b)</sup>	27,8	27.8	27.8	27,8	27,8
Be- bzw. Entladekosten (€/t) <sup>b)</sup>	7,4	2,0	2,0	2,0	2,0
Be- bzw. Entladezeit (t/h) <sup>b)</sup>	60	300	300	300	300

a) (Loriot, 2012, S. 68)

b) (Hamelinck, 2003, S. 47)

c) (Hamelinck, 2003, S. 48) Das Volumen wird mit 0,6 t/m<sup>3</sup> berechnet

d) (Hamelinck, 2003, S. 48) Der Energieverbrauch wird nach der Formel im Dokument berechnet.

e) Für small vessel wurden die Kosten basierend auf (Loriot, 2012, S. 68) mit 10.700€ pro Tag angenommen

---

## 2.5 Pelletierung

Pellets sind mittlerweile ein etabliertes Biomasseprodukt und finden ein breites Anwendungsspektrum.

Pelletierung kann als ein Trocknungs- und Formungsprozess von Biomasse unter hohem Druck bezeichnet werden. Dabei entstehen zylindrische Stücke komprimierter und extrudierter Biomasse. Diese hat ein wesentlich geringeres Volumen bei höherer Energiedichte und ist dadurch hinsichtlich Lagerung, Transport und Energietransformierung wesentlich effizienter als herkömmliche Hackschnitzel. Für die Produktion von Pellets werden kleine Biomassepartikel mit maximal 3-20mm und einem Feuchtigkeitsgehalt unter 10-15% benötigt. Die Pelletierung selbst wird bei einer Temperatur von ungefähr 150°C durchgeführt. (Uslu, Faaij, & Bergman, 2008, S. 1210)

Für das Pressen der Pellets spielt der Feuchtigkeitsgehalt eine wesentliche Rolle. Wenn die Biomasse zu feucht oder zu trocken ist, steigt der benötigte Druck dramatisch an. (vgl. Reed & Bryant, 1978, S. 10) Die Feuchtigkeit in der Biomasse erleichtert die Stärkeverkleisterung, die Proteinentfaltung und den Ballaststofflöslichkeitsprozess während der Verdichtung. Mit Wasserdampf vorbehandelte Biomasse erfährt eine Wärmeänderung und ist der Rohbiomasse durch die Veränderung der physikalischen Eigenschaften überlegen. Die Bindung zwischen den Teilchen wird dadurch verbessert, was zu einer höheren Qualität der Verdichtung führt. (vgl. Tumuluru, Wright, Hess, & Kenney, 2011, S. 694)

## 2.6 Torrefizierungstechnologien

“..., torrefied biomass is a porous product with a low density. It is fragile, which makes it relatively easy to grind. However, decreased mechanical strength and increased dust formation, in addition to low volumetric density, makes further densification desirable. This is especially important when long distance transport is considered. In the ECN Laboratories, the mass density of torrefied biomass pellet has been measured at around 22 MJ/kg, whereas the energy density reaches up to 18 GJ/m<sup>3</sup>.” (Uslu, Faaij, & Bergman, 2008, S. 1208)

Wasser hat auf torrefizierte Biomasse kaum einen Einfluss. Dadurch ist diese beim Be- und Entladevorgang nicht so stark vom Regen gefährdet. (Deutmeyer, 2012, S. 28)

---

Kohle hat einen Hardgrove Index (HGI) von 50 bis 80. Je höher der Wert ist, desto weniger Energie wird zur Zerkleinerung benötigt. Pellets haben eine HGI von 20, wobei torrefizierte Produkte einen Wert von 50 aufweisen. Die Investitionssumme für das Mahl- und Brennereinspeissystem von Kraftwerken beträgt zwischen 70 und 80 Millionen € pro Kraftwerk. Wenn torrefizierte Biomasse mit bestehenden Kohlemühlen zermahlen werden kann, wird es von Kraftwerken bevorzugt eingesetzt werden und die Flexibilität im Anlagenbetrieb erhöhen. (vgl. Deutmeyer, 2012, S. 29) Torrefizierte Biomasse hat sehr viel Ähnlichkeit mit Kohle und Pellets. Somit können des Weiteren die bereits bestehenden Transportketten und Lagerungsmöglichkeiten relativ problemlos benutzt werden. (Deutmeyer, 2012, S. 39)

„In pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce, energy consumption was approximately 100% higher compared to softwood pelletizing, and the amounts of fines were high. The quality of the produced pellets was comparable to (bulk density) or lower than (durability) commercial softwood pellets.“ (Larsson, Rudolfsson, Nordwaeger, Olofsson, & Samuelsson, 2012, S. 6)

### 2.6.1 Rotating Drum

“The rotating drum is a continuous reactor and can be regarded as proven technology for various applications. For torrefaction applications, the biomass in the reactor can be either directly or indirectly heated using superheated steam of flue gas resulting from the combustion of volatiles. The torrefaction process can be controlled by varying the torrefaction temperature, rotational velocity, length and angle of the drum. The drum rotation causes particles in the bed to mix properly and exchange heat, however the friction on the wall also increases the fine fraction. Rotating drums have a limited scalability, therefore higher capacities would require modular setup.” (Koppejan, 2012, S. 15–16)

### 2.6.2 Screw type reactors

“A screw type reactor is a continuous reactor, consisting of one or multiple auger screws that transport the biomass through the reactor. The reactor technology can be considered as proven technology, and can be placed both vertically as well as horizontally. A screw reactor is often heated indirectly using a medium inside the hollow wall or hollow screw, however, there are variations of the reactor concept where heat is applied directly using a twin screw system. A disadvantage of indirectly

---

heated screw reactors is the formation of char on the hot zones. Further, the addition of heat in a screw reactor is rate limited because of the limited mixing of the biomass. The residence time inside the reactor is determined by the length and rotational velocity of the screw. A screw reactor is relatively inexpensive, however, the scalability is limited because the ratio of screw surface area to reactor volume decreases for larger reactors. However, there are reactors designed with highly efficient agitation for improved heat transfer which makes large screw reactors highly efficient.” (Koppejan, 2012, S. 16)

### 2.6.3 Multiple Hearth Furnace (MHF) or Herreshoff oven

„This is a continuous reactor, consisting of multiple layers. It has been proven for various other applications. On every individual layer, a single phase in the torrefaction process takes place. Over the layers, the temperature gradually increases from 220 °C to 300 °C. Biomass enters from the top side of the reactor on a horizontal plate, and is pushed mechanically to the inside. It then falls down through a hole in the plate on a second plate, where biomass is pushed mechanically to the outside, where it falls through another hole, etc. The process is repeated over multiple layers, causing uniform mixing and gradual heating. Heat is applied per individual reactor layer directly using internal gas burners and steam injection. In the upper reactor layers, biomass first dries, in the lower layers torrefaction takes place. The MHF reactor can be scaled up to a diameter of 7 to 8 meter, which results in relatively low specific investments (expressed in EUR per ton/h of product) for large scales. The burners may use natural gas or suspension burners for wood dust from the feedstock. The use of natural gas however for generation of the sweep gas through the reactor contributes to the moisture level and therefore to the moisture content of the torrefied material. This may not necessarily be negative since moisture improves the durability of the pellets after extrusion. Some producers inject moisture in the torrefied material before pelletization. However, natural gas is a fossil fuel and has an affect on the GHG balance for the final torrefied biofuel.“ (Koppejan, 2012, S. 17)

Mit dieser Technologie können verschiedene Partikelgrößen verarbeitet werden. Diese reichen von Sägespänen über große Chips bis zu übergroßen Stöcken. (vgl. Koppejan, 2012, S. 17)

#### 2.6.4 Torbed reactor

„The Torbed reactor technology can be considered as proven technology for various applications, including combustion. Batchwise and continuously operated Torbed installations with a diameter of 5 to 7 meters have already been built. Until recently however, torrefaction in a Torbed technology was only demonstrated batchwise on very small scale (2 kg/h).“ (Koppejan, 2012, S. 18)

Im torbed reactor wird ein Wärmeträgermedium vom Boden mit hoher Geschwindigkeit (80-50m/s) mittels geneigten Flügeln hineingeblasen. Dadurch werden die Teilchen in einem Wirbel durch den Reaktor geblasen. Dies ermöglicht eine intensive Erwärmung mit kurzen Verweilzeiten (ca. 80 Sekunden) und resultiert somit in relativ kleinen Reaktorgrößen. Die intensive Wärmeübertragung kann auch dazu verwendet werden, um den Reaktor bei erhöhten Temperaturen von bis zu 380°C kontrolliert steuern zu können, was zu höheren Verlusten von flüchtigen Stoffen führt. Dadurch ermöglicht diese Technologie eine Flexibilität bei der Vorbereitung des Produkts für unterschiedliche Endanwendungen. Der Nachteil liegt in der Sensitivität des Verfahrens gegenüber schwankender Teilchengröße des Ausgangsmaterials. (vgl. Koppejan, 2012, S. 19)

#### 2.6.5 Moving compact bed

“This continuous reactor consists of an enclosed reactor vessel, where biomass enters from the top, and moves down gradually while the torrefaction process takes place as a result of a heat carrying gaseous medium, which enters from bottom to top. The reactor does not entail any moving parts. At the reactor bottom, the torrefied product leaves the reactor and is cooled down. At the top of the reactor, gaseous reaction products (volatiles) are removed. The torrefaction process conditions are similar to the other technologies (residence time 30 - 40 minutes; process temperature approx 300 °C).“ (Koppejan, 2012, S. 19ff)

Ein großes Risiko stellt das Fehlen der richtigen Durchmischung der Biomasseteilchen dar. Es könnte zu einer Kanalisierung des Wärmeüberträgermediums durch das Bett kommen, was zu einem ungleichförmigen Produkt am Reaktorboden führt. In einem 100 kg/h Versuchsreaktor wurde dieser Effekt noch nicht beobachtet, mit größeren Kapazitäten erhöht sich aber dieses Risiko. Im Vergleich zum torbed reactor ist der Füllgrad des Reaktors relativ hoch, da das komplette Reaktorvolumen für das Verfahren verwendet wird. Der Druckabfall

---

über dem Bett ist besonders bei kleinen Biomasseteilchen (<5mm) hoch. Durch Sieben des Materials kann dies teilweise vermieden werden. Allerdings ist die Bildung von kleinen Teilchen im Inneren des Reaktors nicht zu vermeiden, da hier der Druck am größten ist. (vgl. Koppejan, 2012, S. 20)

### 2.6.6 Belt dryer

„The belt dryer can be considered as proven technology for biomass drying applications. While biomass particles are transported using a moving, porous belt, they are directly heated using a hot gaseous medium. In a belt dryer reactor, usually multiple belts are placed on top of one another. While biomass particles fall from one belt on the other, mixing of the particles takes place, resulting in a more homogeneous product.“ (Koppejan, 2012, S. 21)

### 2.6.7 Microwave reactor

“An alternative option that has been tried to torrefy biomass is by using microwave energy. A key disadvantage, however, is that electricity is required for the microwave, which is difficult to produce with acceptable efficiencies from the torrefaction gas. This negatively influences the energy efficiency and the operational costs.” (Koppejan, 2012, S. 21)

### 2.6.8 TOP

Ein Biomassepelletierungsprozess besteht typischerweise aus Trocknung, Zerkleinerung und anschließender Verdichtung. Nach der Verdichtung werden die Biopellets gekühlt. Durch Dampfkonditionierung der Biomasse werden die Fasern aufgeweicht um das Verdichtungsverfahren zu erleichtern. Die Torrefizierung wird typischerweise mit einer Vortrocknung und einer nachträglichen Kühlung kombiniert. Aufgrund der großen Ähnlichkeit der beiden Prozesse, kombiniert TOP Torrefizierung und Pelletierung. TOP ist somit ein Pelletierungsprozess, bei dem die Trocknung und Zerkleinerung mit einem Torrefizierungsschritt erweitert wird. Als Produkt erhält man torrefizierte Pellets. (vgl. Bergman, 2005, S. 13ff)

Die thermale Effizienz des TOP liegt auf LHV Basis typischerweise bei 96%. Die Vortrocknung der Biomasse ist Hauptverursacher des Wirkungsgradverlusts. Durch eine optimale Einstellung der Torrefizierungsbedingungen (Temperatur und Reaktionszeit) kann das thermische Gleichgewicht und somit eine optimierte Effizienz

---

erreicht werden. Des Weiteren ist der Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse für die Wärmebilanz von größter Bedeutung, da die Eigenschaften des eingesetzten Materials zum Großteil für den gesamten erforderlichen Wärmebedarf verantwortlich sind. (P. C. . Bergman, 2005, S. 15)

„In the TOP process, the torrefaction conditions can be optimised to operate it near or at the point of autothermal operation. Under such conditions drying is fuelled practically by the torrefaction gas, see also Figure 2.2 (lower part). This eliminates the need for a complex and expensive drying unit.“ (P. C. . Bergman, 2005, S. 16)

Der Wirkungsgrad des Verfahrens sinkt mit höheren Entgasungsraten und niedrigerem Feuchtigkeitsgehalt der Biomasse, da die Energie welche in den freigesetzten flüchtigen Bestandteilen enthalten ist, größer ist, als jene welche zur Verdampfung der Feuchtigkeit in der Biomasse benötigt wird. Ebenso ist die Prozesseffizienz für nasse Biomasse ebenfalls nicht optimal. Ab dem Zeitpunkt wo es gerade genug Torgas (Teile der Trockenmasse welche sich bei der Torrefizierung in flüchtige Gase verwandeln) zum Betreiben dieses Verfahrens gibt, ist keine zusätzliche Biomasse notwendig, um die Feuchtigkeit zu verdampfen. In der Praxis ist dieser autothermale Zustand ein theoretischer Zustand welcher in einem realen Prozess nur sehr schwer erreicht werden kann. Aus diesem Grund wird in der Praxis der Torrefizierungsprozess nicht die optimale Leistung erreichen. (vgl. Koppejan, Sokhansanj, Melin, & Madrali, 2012, S. 4ff)

“In addition to the thermal efficiency, electric energy is consumed for several process steps (conveyors, dryers, pellet presses etc.). Given the same amount of input material, a torrefied pellet plant do not have a higher electricity consumption than a conventional wood pellet plant since the electricity consumption of the torrefaction reactor is more or less compensated by the lower electricity consumption for grinding material before pelletisation. It is not clear yet if less power is needed for pelletisation.”(Deutmeyer, 2012, S. 5ff)

### 2.6.9 Ermittelte Werte für Torrefizierung und Pelletierung

In Tabelle 2.14 findet man die aus der Literatur entnommenen Werte, welche zur Berechnung für Torrefizierung, TOP und Pelletierung benötigt werden.

**Tabelle 2.14** Eruierte Werte für Torrefizierung, TOP und Pelletierung

	Torrefizierung	TOP	Pelletierung
Energy-e [kWh/ton] <sup>a)</sup>	92	102	129
Energy-f [GJ/t] <sup>a)</sup>	-	-	2,1
Masse nach TOP [kg] <sup>d)</sup>	-	0,48	-
Produktionskosten [€/t] <sup>a)</sup>	58	45	41
Produktionskosten [€/GJ] <sup>a)</sup>	3,2	2,5	3,4
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ] <sup>a)</sup>	230	750-850	500-650
Menge Input [t/J] <sup>b)</sup>	170.000	170.000	170.000
Menge Output [t/J] <sup>b)</sup>	-	56.000	80.000
Wassergehalt [%] <sup>a)</sup>	3	1-5	7-10
Auslastungsfaktor [h/J] <sup>a)</sup>	-	7500	7500
Durchschnittsmenge Input [t/h]	-	22,66	22,66
Energiedichte [GJ/m <sup>3</sup> ]	4,6	15,0-18,7 <sup>c)</sup>	7,8 <sup>b)</sup> -12,0 <sup>c)</sup>
Energiedichte [MJ/kg] <sup>c)</sup>	-	20–24	17-18

a) aus (Uslu, Faaij, & Bergman, 2008, S. 1212)

b) aus (P. C. . Bergman, 2005, S. 18–19)

c) aus (Deutmeyer, 2012, S. 16)

d) aus (Batidzirai, Mignot, Schakel, Junginger, & Faaij, 2013, S. 9)

## 2.7 Energiekosten

Die Energiekosten in Tabelle 2.15 werden für die Berechnung der Zugtransportkosten benötigt da in jedem Land unterschiedliche Strompreise vorliegen. Für die Umrechnung von Dollar in Euro wird ein Umrechnungsfaktor von 0,76 verwendet (05.Juni 2013).

**Tabelle 2.15** Eruierte Werte für Energiekosten

	\$/kWh	€/kWh
Niederlande <sup>a)</sup>	0,1128	0,09
Schweden <sup>a)</sup>	0,0795	0,06
Finnland <sup>a)</sup>	0,0864	0,07
Kanada <sup>a)</sup>	0,0758	0,06
Brasilien <sup>b)</sup>	-	0,08
Nicaragua <sup>c)</sup>	-	0,15

a) <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/13020/umfrage/strompreise-in-ausgewaehlten-laendern/>

abgerufen am 18.06.2013

b) [http://www.exportinitiative.bmwi.de/EEE/Redaktion/Events/2012/Geschaeftsreisen/Downloads/2012-AHK-Gesch\\_C3\\_A4ftsreise-Brasilien-factsheet.property=pdf,bereich=eee,sprache=de,rwb=true.pdf](http://www.exportinitiative.bmwi.de/EEE/Redaktion/Events/2012/Geschaeftsreisen/Downloads/2012-AHK-Gesch_C3_A4ftsreise-Brasilien-factsheet.property=pdf,bereich=eee,sprache=de,rwb=true.pdf)

abgerufen am 18.06.2013

c) <http://www.klein-windkraftanlagen.com/wp-content/uploads/2013/04/Factsheet-EE-Nicaragua-2013.pdf>

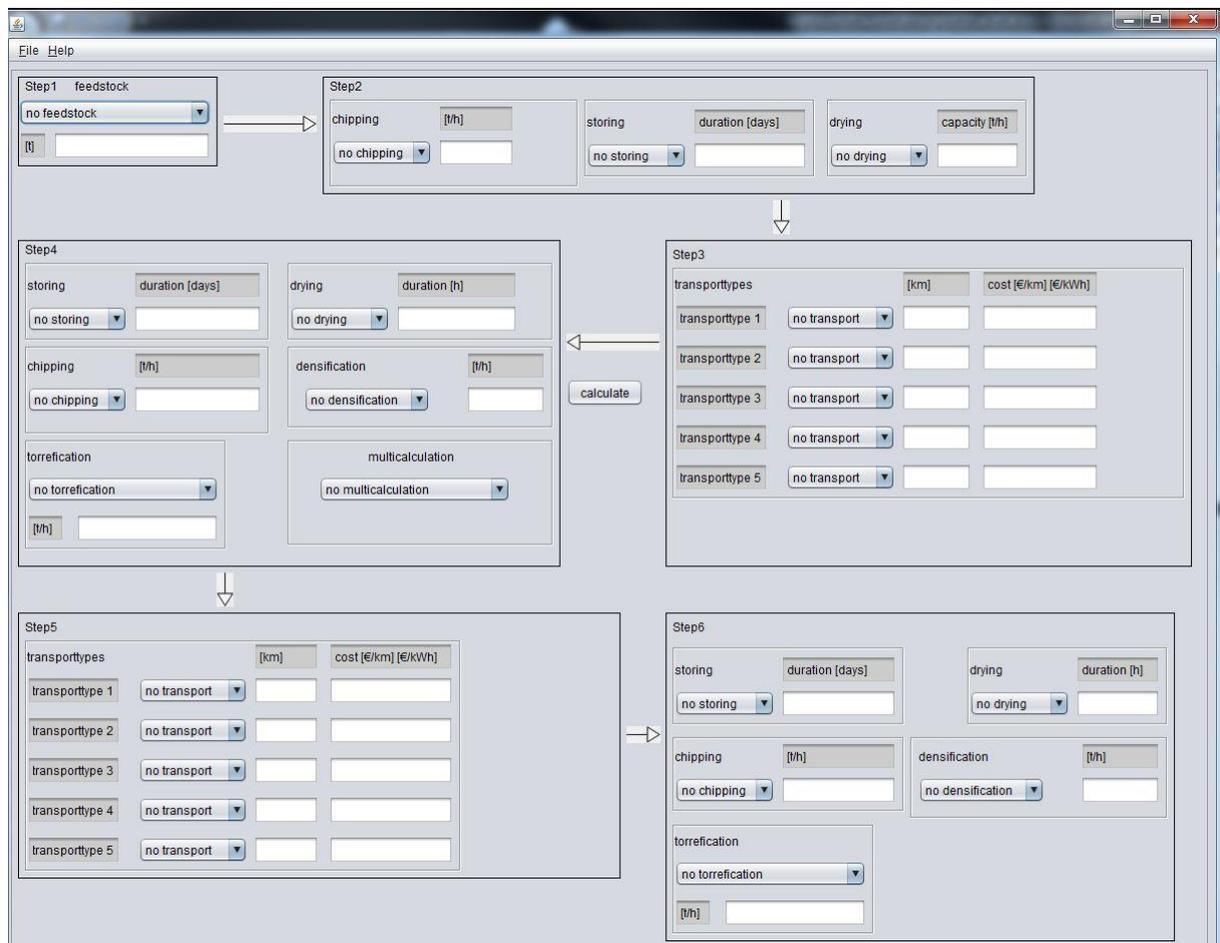
abgerufen am 18.06.2013

### 3 Tooldokumentation

Um die Berechnung der verschiedenen Biomasseversorgungsketten zu vereinfachen, wurde ein Softwaretool mittels JAVA implementiert. Dies ermöglicht eine Vielzahl an Biomasseversorgungsketten mit erheblich geringerem Aufwand zu erstellen und die Ergebnisse für jede einzelne Kette und deren Zwischenschritte in einer Tabellenstruktur zu erhalten. Im Folgenden werden das Tool, sowie das zur Berechnung notwendige Datenfile beschrieben.

#### 3.1 Softwaretool

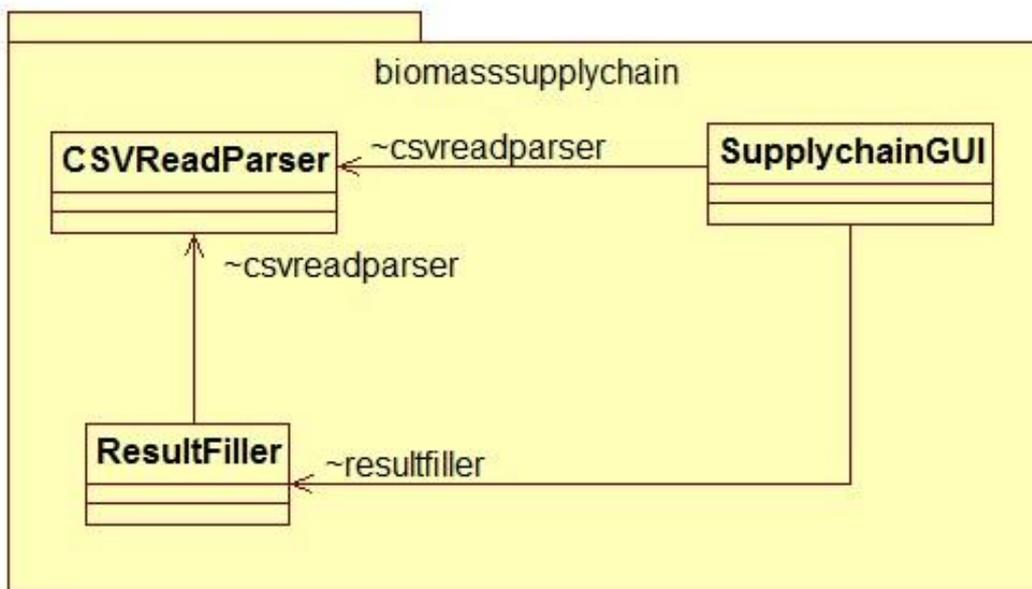
Das Tool wurde mittels Java implementiert. Als Datenstamm dient ein .csv File.



**Abb. 3.1** Softwaretoolscreenshot

Das Tool liest die Daten aus dem ausgewählten Datenfile ein und berechnet die in der Eingabemaske definierte Kette. Als Ergebnis erhält man eine .csv Datei, in welcher alle Zwischen- und Endergebnisse gespeichert sind.

Das Programm selbst besteht aus den Klassen CSVReadParser, SupplychainGUI und ResultFiller im Package biomasssupplychain, welche in Abb. 3.2 abgebildet sind. Der Aufruf der Klasse SupplychainGUI bewirkt den Start des Programms und es erscheint die GUI (graphical user interface) welche in Abb. 3.1 abgebildet ist. Nach Auswahl des Datenfiles (welches in Kapitel 0 Datenfile beschrieben wird), werden die darin enthaltenen Daten mittels der Klasse CSVReadParser in ein Array übertragen und zwischengespeichert. In der Klasse ResultFiller werden sowohl die Berechnungen durchgeführt, als auch die Ergebnisse in ein Array gespeichert. Diese werden dann wiederum in ein .csv File übertragen.



**Abb. 3.2** Klassendiagramm des Tools

In der GUI können in sechs einzelnen Schritten Daten ausgewählt und eingegeben werden. Um eine Berechnung durchführen zu können, ist nur die Durchführung des ersten Schrittes notwendig. Alle anderen sind optional. Allerdings ist dies nicht sinnvoll, da als Ergebnis nur der ausgewählte Feedstock und die Kosten für diesen geliefert werden.



**Abb. 3.3** Erster Versorgungskettenschritt im Tool

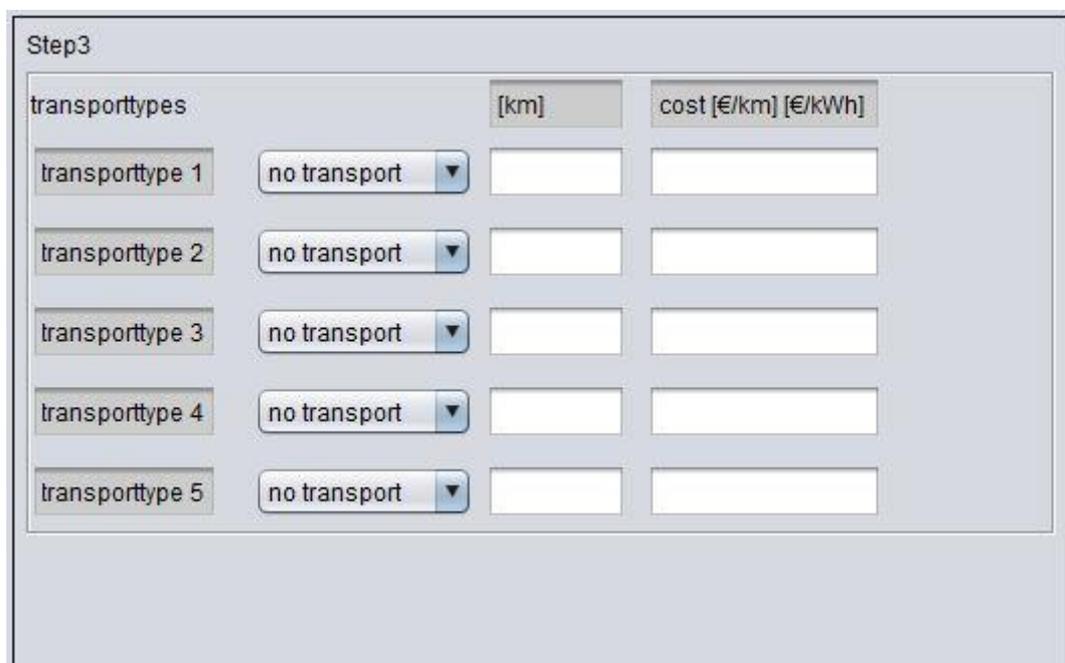
Im ersten (siehe Abb. 3.3) Schritt wird das zu verwendende Ausgangsmaterial für die Biomasseversorgungskette gewählt. Des Weiteren ist die Menge in Tonnen anzugeben.



The screenshot shows a window titled "Step2" with three main sections. The first section is labeled "chipping" and has a unit "[t/h]" above a text input field. Below it is a dropdown menu with "no chipping" selected. The second section is labeled "storing" and has a unit "duration [days]" above a text input field. Below it is a dropdown menu with "no storing" selected. The third section is labeled "drying" and has a unit "capacity [t/h]" above a text input field. Below it is a dropdown menu with "no drying" selected.

**Abb. 3.4** Zweiter Versorgungskettenschritt im Tool

Im zweiten Schritt (siehe Abb. 3.4) gibt es die Möglichkeit Zerkleinerung, Lagerung und/oder Trocknung auszuwählen. Wenn Zerkleinerung oder Trocknung ausgewählt wird, werden die in das Datenfile eingegebenen Daten im Textfeld angezeigt. Diese können nachträglich noch verändert werden, um die Benutzerfreundlichkeit zu steigern. Wenn eine Lagerungsart ausgewählt wird, muss zwingend ein Wert eingegeben werden. Werden in diesem Schritt alle Auswahlmöglichkeiten genutzt, so werden sie in der Reihenfolge Lagerung, Trocknung und Zerkleinerung abgearbeitet.



The screenshot shows a window titled "Step3" with a table-like structure. The table has three columns: "transporttypes", "[km]", and "cost [€/km] [€/kWh]". There are five rows, each labeled "transporttype 1" through "transporttype 5". Each row contains a dropdown menu with "no transport" selected, followed by a text input field for distance and another for cost.

transporttypes	[km]	cost [€/km] [€/kWh]
transporttype 1	<input type="text"/>	<input type="text"/>
transporttype 2	<input type="text"/>	<input type="text"/>
transporttype 3	<input type="text"/>	<input type="text"/>
transporttype 4	<input type="text"/>	<input type="text"/>
transporttype 5	<input type="text"/>	<input type="text"/>

**Abb. 3.5** Dritter Versorgungskettenschritt im Tool

Im dritten Schritt (siehe Abb. 3.5) können bis zu 5 Transportmittel für die Biomasseversorgungskette ausgewählt werden. Nach der Auswahl eines

Transportmittels erscheinen automatisch die Kosten, welche vom Datenfile übernommen werden im Textfeld. Für LKW und Schiff werden die Kosten in €/km angegeben, für Züge in €/kWh. Diese können im Textfeld noch vor der Berechnung editiert werden.

The screenshot shows a software interface for 'Step4' with the following components:

- storing**: A dropdown menu set to 'no storing' and a text input field labeled 'duration [days]'.
- drying**: A dropdown menu set to 'no drying' and a text input field labeled 'duration [h]'.
- chipping**: A dropdown menu set to 'no chipping' and a text input field labeled '[t/h]'.
- densification**: A dropdown menu set to 'no densification' and a text input field labeled '[t/h]'.
- torrefication**: A dropdown menu set to 'no torrefication' and a text input field labeled '[t/h]'.
- multicalculation**: A dropdown menu set to 'no multicalculation'.

**Abb. 3.6** Vierter Versorgungskettenschritt im Tool

Im vierten Schritt (siehe Abb. 3.6) gibt es die Möglichkeit Lagerung, Trocknung, Zerkleinerung, Torrefizierung und Verdichtung auszuwählen. Auch hier werden die im .csv File gespeicherten Daten bei Auswahl einer Dropdown-Liste, im daneben befindlichen Textfeld angezeigt. Diese können nachträglich noch verändert werden, um die Benutzerfreundlichkeit zu steigern. Bei der Auswahl von Lagerung und Trocknung müssen Daten eingegeben werden, da es sich hier um die Dauer der Lagerung bzw. Trocknung handelt. Werden in diesem Schritt alle Auswahlmöglichkeiten genutzt, so werden diese in der Reihenfolge Lagerung, Trocknung, Zerkleinerung, Verdichtung und Torrefizierung abgearbeitet. Bei der Auswahl von multicalculation liefert die Berechnung die Biomasseversorgungskettenergebnisse sowohl für Pelletierung als auch für TOP. Diese werden beide in das Ergebnisfile geschrieben. Somit erleichtert dies die Auswertung der Daten und es müssen nicht zwei einzelne Berechnungen mit dem Tool durchgeführt werden.

Step5

transporttypes		[km]	cost [€/km] [€/kWh]
transporttype 1	no transport ▼		
transporttype 2	no transport ▼		
transporttype 3	no transport ▼		
transporttype 4	no transport ▼		
transporttype 5	no transport ▼		

**Abb. 3.7** Fünfter Versorgungskettenschritt im Tool

Im fünften Schritt (siehe Abb. 3.7) können wie im Schritt drei bis zu 5 Transportmittel für die Biomasseversorgungskette ausgewählt werden. Nach der Auswahl eines Transportmittels erscheinen automatisch die Kosten, welche vom Datenfile übernommen werden im Textfeld. Für LKW und Schiff werden die Kosten in €/km angegeben, für Züge in €/kWh. Diese können im Textfeld noch vor der Berechnung editiert werden.

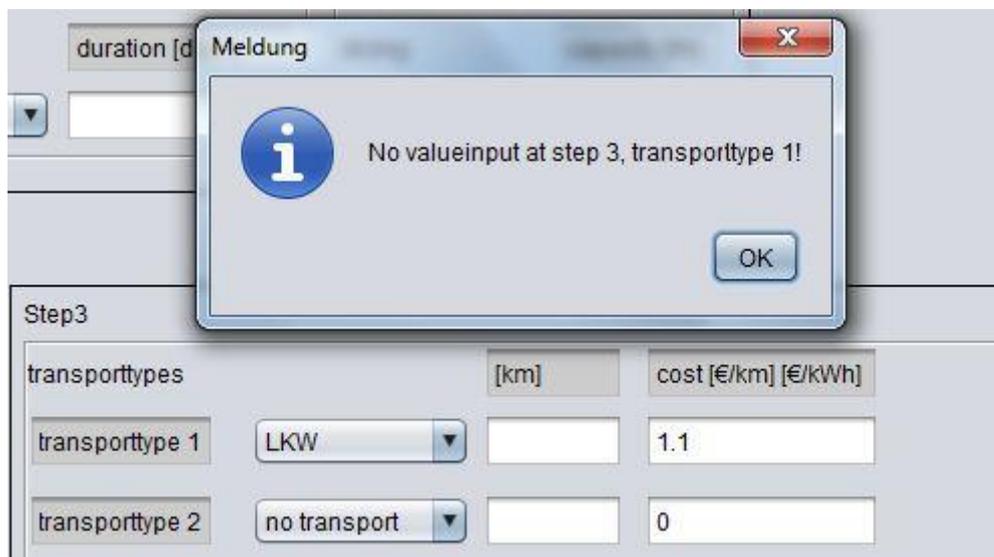
Step6

storing	duration [days]	drying	duration [h]
no storing ▼		no drying ▼	
chipping	[t/h]	densification	[t/h]
no chipping ▼		no densification ▼	
torrefication			
no torrefication ▼			
[t/h]			

**Abb. 3.8** Sechster Versorgungskettenschritt im Tool

Im sechsten Schritt (siehe Abb. 3.8) gibt es die Möglichkeit Lagerung, Trocknung, Zerkleinerung, Torrefizierung und Verdichtung auszuwählen. Auch hier werden die in das Datenfile eingegebenen bei Auswahl einer Dropdown-Liste, im daneben befindlichen Textfeld angezeigt. Diese können nachträglich noch editiert werden, um die Benutzerfreundlichkeit zu steigern. Bei der Auswahl von Lagerung und Trocknung müssen Daten eingegeben werden, da es sich hier um die Dauer der Lagerung bzw. Trocknung handelt. Werden in diesem Schritt alle Auswahlmöglichkeiten genutzt, so werden diese in der Reihenfolge Lagerung, Trocknung, Zerkleinerung, Verdichtung und Torrefizierung abgearbeitet.

Damit die Berechnung für die Biomasseversorgungskette durchgeführt wird, muß der calculate Button gedrückt werden. Wenn der Benutzer fehlerhafte Daten eingegeben hat erscheint eine Fehlermeldung, die ihm auf die Stelle des Fehlers hinweist (siehe Abb. 3.9). Die Ergebnisse der Berechnung werden in ein .csv-File gespeichert und können nun zur weiteren Analyse verwendet werden.



**Abb. 3.9** Fehlermeldung im Tool

---

## 3.2 Datenfile

Das Datenfile liegt im CSV-Format vor. Hierbei ist zu beachten, dass dieses im englischen Format abgespeichert ist und somit beim Komma ein Punkt anstelle eines Beistriches steht. Das Datenfile ist in die nachfolgenden Datenstämme aufgliedert.

### 3.2.1 Feedstock

Im Feedstock findet man für die verschiedenen Feedstockarten noch folgende Daten:

- Kosten in €/t
- Kosten in €/GJ<sub>HHV</sub>
- Dichte in kg/m<sup>3</sup>
- Feuchtegehalt in %

### 3.2.2 Transporttyp

Beim Transporttyp findet man für die verschiedenen Transportarten noch folgende Daten:

- Ladekapazität in t
- Ladekapazität in m<sup>3</sup>
- Kosten in €/km für Schiff und LKW
- Kosten in €/kWh für Zug
- Be- und Entladekosten in €/m<sup>3</sup>
- Be- und Entladekosten in €/t
- Be- und Entladegeschwindigkeit in m<sup>3</sup>/h
- Transportgeschwindigkeit in km/h
- Energieverbrauch in MJ<sub>HHV</sub>/km
- Energieverbrauch in kWh/km
- Spritverbrauch in l/km

### 3.2.3 Zerkleinern

Beim Zerkleinern findet man für die verschiedenen Zerkleinerungstechnologien noch folgende Daten:

- Kapazität in t/h
- Dichte in kg/m<sup>3</sup> nach der Zerkleinerung
- Energieaufwand in kWh/t

### 3.2.4 Lagerung

Bei der Lagerung findet man für die verschiedenen Lagerungsmöglichkeiten noch folgende Daten:

- Kosten in €/m<sup>3</sup> pro Jahr
- Feuchtigkeitsverlust in %/Monat

### 3.2.5 Verarbeitung

Bei der Verarbeitung findet man für die verschiedenen Verarbeitungstechnologien noch folgende Daten:

- Kapazität in t/h
- Endproduktichte in kg/m<sup>3</sup>
- Energieverbrauch in kWh/t
- Produktionskosten in €/t
- Feuchtigkeitsgehalt des Endprodukts in %
- Energiedichte des Endprodukts in GJ/t

### 3.2.6 Trocknung

Bei der Trocknung findet man für die verschiedenen Trocknungstechnologien noch folgende Daten:

- Kapazität in t/h
- Wärmeverbrauch in MW
- Energieaufwand in kWh/t
- Trocknungskosten in €/t
- Feuchtigkeitsgehalt nach Trocknung in %

### 3.2.7 Torrefizierung

Bei der Torrefizierung findet man für die verschiedenen Verarbeitungstechnologien noch folgende Daten:

- Kapazität in t/h
- Endproduktichte in kg/m<sup>3</sup>
- Energieverbrauch in kWh/t
- Produktionskosten in €/t
- Massenreduzierungsfaktor

### 3.3 Berechnungsschritte

Das Tool berechnet bei jedem Schritt die Kosten in €, die benötigte Zeit in h und die Energiebereitstellungseffizienz. Die Energiebereitstellungseffizienz bemisst den Energiewert den das Produkt am Ende der Biomasseversorgungskette aufweist, abzüglich der Energie, welche während der Biomasseversorgungskette aufgewendet wurde.

#### 3.3.1 Feedstock

Der Benutzer wählt den Feedstocktyp aus und gibt die zu berechnende Menge in t ein. Das Volumen in m<sup>3</sup> ( $V$ ) des gewählten Feedstocks wird mittels Division der Masse in t ( $m_t$ ) durch die Dichte in kg/m<sup>3</sup> ( $\rho$ ) berechnet.

$$V = \frac{m_t * 1000}{\rho}$$

#### 3.3.2 Feedstockkosten

Die Feedstockkosten ( $K_F$ ) werden durch Multiplikation der Kosten pro t ( $K_{Fm}$ ) und der Masse in t ( $m_t$ ) berechnet.

$$K_F = K_{Fm} * m_t$$

#### 3.3.3 Low heating value berechnen

Der low heating value ( $LHV$ ) errechnet sich aus dem Feuchtigkeitsgehalt, der Energie pro t ( $E_{Fm}$ ) in high heating value (HHV) und der Verdampfungsenthalpie des Wassers (2,447).

$$LHV = ((1 - FG) * E_{Fm}) - (2,447 * FG)$$

#### 3.3.4 Feedstockgesamtenergie

Die Feedstockgesamtenergie ( $E_F$ ) wird durch Multiplikation des LHV und der Masse in t ( $m_t$ ) berechnet.

$$E_F = LHV * m_t$$

### 3.3.5 Lagerkosten

Die Lagerkosten ( $K_L$ ) werden ermittelt, in dem man die Lagerkosten ( $K_{LJ}$ ) pro m<sup>3</sup> und Jahr mit der Dauer der Lagerung ( $D$ ) und dem Volumen ( $V$ ) des Feedstocks multipliziert.

$$K_L = K_{LJ} * D * V$$

Da die Lagerkosten immer für ein Jahr angegeben werden, erfolgt die Berechnung mit 365 Tagen pro Kalenderjahr, um die Lagerkosten für einen Tage ermitteln zu können.

### 3.3.6 Feuchtigkeitsverlust durch Lagerung

Durch die Lagerung kann es zu Feuchtigkeitsverlusten kommen. Dies gilt im Besonderen für frisch gefälltes Holz. Da der Feuchtigkeitsverlust pro Monat angegeben wird, werden für ein Monat 30,5 Tage zur Berechnung herangezogen. Der Feuchtigkeitsgehalt nach Lagerung ( $FG_{nL}$ ) errechnet sich durch den Feuchtigkeitsgehalt zu Beginn der Lagerung ( $FG_{vL}$ ) minus des Feuchtigkeitsverlust pro Monat in % ( $FV_M$ ) multipliziert mit der Dauer ( $D$ ). Um sicherzustellen, dass der Feuchtigkeitsgehalt bei zu langer Lagerung nicht in den Minusbereich sinkt, wurde im Programm eine untere Schwelle von 15% implementiert.

$$FG_{nL} = FG_{vL} - FV_M * D$$

Um das Gewicht des Feedstocks nach der Lagerung zu ermitteln wird dieses in Gewicht von Wasser, sowie Trockenmasse aufgesplittet.

Die Masse des Wassers ( $m_{WvL}$ ) errechnet sich durch die Multiplikation der Masse des Feedstocks ( $m$ ) mit dem Feuchtigkeitsgehalt ( $FG_{vL}$ ) und die Division durch 100. Die Division durch 100 ist aufgrund des Feuchtigkeitsgehalts welcher in % angegeben ist notwendig.

$$m_{WvL} = \frac{m * FG_{vL}}{100}$$

Die Masse der Trockenmasse ( $m_T$ ) errechnet sich durch die Multiplikation der Masse des Feedstocks ( $m$ ) mit der Subtraktion von 100 und des Feuchtigkeitsgehalts vor Lagerung, sowie der Division durch 100. Die Division durch 100 ist aufgrund des Feuchtigkeitsgehalts welcher in % angegeben ist notwendig.

$$m_T = \frac{m * (100 - FG_{vL})}{100}$$

Die Masse des verbliebenen Wassers nach der Lagerung ( $m_{WnL}$ ) errechnet sich durch die Multiplikation der Masse des Wassers vor der Lagerung ( $m_{WvL}$ ) mit 100 (Feuchtigkeitsgehalt ist in % angegeben, somit ist hier die Multiplikation mit 100 notwendig) und der Division durch den Feuchtigkeitsgehalt vor der Lagerung ( $FG_{vL}$ ). Der Feuchtigkeitsgehalt nach Lagerung ( $FG_{nL}$ ) wird wieder aufgrund der Angabe in % durch 100 dividiert. Die Multiplikation der beiden Teilergebnisse liefert die Masse des verbliebenen Wassers nach Lagerung.

$$m_{WnL} = \frac{m_{WvL} * 100}{FG_{vL}} * \frac{FG_{nL}}{100}$$

Somit ergibt sich durch die Summierung von Trockenmasse und Masse des Wassers das Gesamtgewicht nach Lagerung ( $m_{nL}$ ).

$$m_{nL} = m_{WnL} + m_T$$

### 3.3.7 Transportkosten

Anhand des Gewichts ( $m$ ) und des Volumens ( $V$ ), wird die Anzahl der benötigten Transportmittel errechnet. Die benötigte Anzahl an Transportmittel anhand des Volumens ( $T_{AV}$ ) errechnet sich durch die Division des Volumens der Biomasse ( $V$ ) durch die Volumenkapazität des Transportmittels ( $V_T$ ).

$$T_{AV} = \frac{V}{V_T}$$

Die benötigte Anzahl an Transportmittel anhand der Masse ( $m$ ) errechnet sich durch die Division der Masse der Biomasse ( $m$ ) durch die Massekapazität des Transportmittels ( $m_T$ ).

$$T_{Am} = \frac{m}{m_T}$$

Die größere errechnete Anzahl an Transportmitteln wird aufgerundet und zur weiteren Berechnung verwendet ( $T_A$ ).

Die Kostenberechnung für Be- und Entladung erfolgt durch Multiplikation des Volumens der verwendeten Biomasse ( $V$ ), mit den Kosten für einen Ladevorgang ( $K_{LV}$ ) und dem Faktor zwei.

$$K_{BE} = V * K_{LV} * 2$$

Durch die Multiplikation der Kosten pro gefahrenen km ( $K_S$ ), der Anzahl an Transportmittel ( $T_A$ ) sowie der Länge der zu hinterlegenden Strecke ( $l_{km}$ ) erhält man die Transportkosten für die zurückgelegte Strecke. Durch Hinzufügen der Be- und Entladekosten ( $K_{BE}$ ) sind die Transportkosten ( $K_T$ ) komplettiert.

$$K_T = K_{BE} + K_S * T_A * l_{km}$$

Für Züge müssen noch die Kosten pro kWh ( $K_{kW}$ ) mit der Streckenlänge ( $l_{km}$ ) der Anzahl an benötigten Transportmittel ( $T_A$ ) und des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) multipliziert werden.

$$K_{TZ} = K_T + K_{kW} * l_{km} * T_A * E_e$$

### 3.3.8 Transportdauer

Die Transportdauer ( $t_{TF}$ ) errechnet sich mittels Division der Wegstrecke ( $s_T$ ) durch die Durchschnittsgeschwindigkeit ( $v_T$ ), multipliziert mit der Anzahl an Transportmitteln ( $T_A$ ).

$$t_{TF} = \frac{s_T}{v_T} * T_A$$

Die Be- und Entladegeschwindigkeit für LKW und Zug errechnet sich durch Division des Volumens ( $V$ ) der Biomasse durch die Be- und Entladegeschwindigkeit ( $v_{BE}$ ) und der Multiplikation mit dem Faktor 2.

$$t_{TBELZ} = \frac{V}{v_{BE}} * 2$$

Die Be- und Entladegeschwindigkeit für Schiffe, errechnet sich durch Division der Masse ( $m$ ) der Biomasse durch die Be- und Entladegeschwindigkeit ( $v_{BE}$ ) und der Multiplikation mit dem Faktor 2.

$$t_{TBES} = \frac{m}{v_{BE}} * 2$$

Die Summe von Transportdauer, sowie Be- und Entladegeschwindigkeit ergibt die Gesamttransportdauer ( $t_T$ ).

$$t_T = t_{TBELZ} + t_{TBES} + t_{TF}$$

### 3.3.9 Energieverbrauch bei Transport

Für LKW und Schiffe wird der Energieverbrauch ( $E_Z$ ) durch die Multiplikation des fossilen Energiewerts ( $E_f$ ) und der Transportdistanz ( $l_{km}$ ) berechnet.

$$E_T = E_f * l_{km} * T_A$$

Für Züge wird der Energieverbrauch ( $E_{TZ}$ ) durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ), der Transportdistanz ( $l_{km}$ ) und der Anzahl an benötigten Transportmittel berechnet.

$$E_{TZ} = E_e * l_{km} * T_A$$

### 3.3.10 Zerkleinerungskosten

Die Zerkleinerungskosten ( $K_Z$ ) werden durch die Multiplikation von Masse der Biomasse ( $m$ ) und den Kosten pro Tonne ( $K_{Zt}$ ) berechnet.

$$K_Z = m * K_{Zt}$$

### 3.3.11 Energieverbrauch bei Zerkleinerung

Der Energieverbrauch ( $E_Z$ ) wird durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) und der Masse des Feedstocks ( $m$ ) berechnet.

$$E_Z = E_e * m$$

Der Umrechnungsfaktor von kWh auf Joule beträgt: 1 kWh = 3,6MJ

### 3.3.12 Trocknungskosten

Die Trocknungskosten ( $K_{TR}$ ) werden durch die Multiplikation von Masse der Biomasse ( $m$ ) und den Kosten pro Tonne ( $K_{TRt}$ ) berechnet.

$$K_{TR} = m * K_{TRt}$$

### 3.3.13 Energieverbrauch bei Trocknung

Der Energieverbrauch ( $E_{TR}$ ) wird durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) und der Masse des Feedstocks ( $m$ ) berechnet.

$$E_{TR} = E_e * m$$

### 3.3.14 Kosten der Verdichtung

Die Verdichtungskosten ( $K_V$ ) werden durch die Multiplikation von Masse der Biomasse ( $m$ ) und den Kosten pro Tonne ( $K_{Vt}$ ) berechnet.

$$K_V = m * K_{Vt}$$

### 3.3.15 Energieverbrauch bei Verdichtung

Der Energieverbrauch ( $E_V$ ) wird durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) und der Masse des Feedstocks ( $m$ ) berechnet.

$$E_{VE} = E_e * m$$

### 3.3.16 Masse der Pellets nach Pelletierung

Die Masse nach Pelletierung ( $m_{nP}$ ) wird durch die Division der Trockenmasse des Feedstocks ( $m_T$ ) durch den Feuchtegehalt nach Pelletierung ( $F_{nP}$ ) berechnet.

$$m_{nP} = \frac{m_T}{100 - F_{nP}}$$

### 3.3.17 Energieverbrauch bei Pelletierung

Der Energieverbrauch bei Pelletierung ( $E_P$ ) wird durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) und der Masse des Feedstocks ( $m$ ) berechnet. Zu diesem wird das Ergebnis der Multiplikation der Energy-f ( $E_f$ ) und des Gesamtgewicht nach Lagerung ( $m_{nL}$ ) addiert.

$$E_P = E_e * m + E_f * m_{nL}$$

Der Umrechnungsfaktor von kWh auf Joule beträgt: 1 kWh = 3,6MJ

### 3.3.18 Endenergiewert der Pellets nach Pelletierung

Der Endenergiewert der Pellets ( $E_P$ ) errechnet sich durch Multiplikation der Masse nach Pelletierung ( $m_{nP}$ ) mit dem low heating value ( $LHV$ ).

$$E_P = m_{nP} * LHV$$

### 3.3.19 Energiedichte der Pellets nach Pelletierung

Die Energiedichte der Pellets ( $\rho_P$ ) errechnet sich durch Division des Endenergiewertes der Pellets ( $E_P$ ) durch die Masse nach Pelletierung ( $m_{nP}$ ).

$$\rho_P = \frac{E_P}{m_{nP}}$$

### 3.3.20 Kosten der Pelletierung

Die Pelletierungskosten ( $K_P$ ) werden durch die Multiplikation von Masse der Biomasse ( $m$ ) und den Kosten pro Tonne ( $K_{Pt}$ ) berechnet.

$$K_P = m_{nP} * K_{Pt}$$

### 3.3.21 Kosten der Torrefizierung

Die Torrefizierungskosten ( $K_{TO}$ ) werden durch die Multiplikation von Masse der Biomasse ( $m$ ) und den Kosten pro Tonne ( $K_{Tt}$ ) berechnet.

$$K_{TO} = m * K_{Tt}$$

### 3.3.22 Energieverbrauch bei Torrefizierung

Der Energieverbrauch ( $E_{TO}$ ) wird durch die Multiplikation des elektrischen Energiewerts ( $E_e$ ) und der Masse des Feedstocks ( $m$ ) berechnet.

$$E_{TO} = E_e * m$$

Der Umrechnungsfaktor von kWh auf Joule beträgt: 1 kWh = 3,6MJ

### 3.3.23 Masse der TOP-Pellets nach Torrefizierung

Die Masse nach Torrefizierung ( $m_{nT}$ ) wird durch die Multiplikation der Masse des Feedstocks vor der Torrefizierung ( $m_{vT}$ ) mit dem Massereduzierungsfaktor ( $F_{mr}$ ) berechnet.

$$m_{nT} = m_{vT} * F_{mr}$$

### 3.3.24 Endenergiewert der TOP-Pellets nach Torrefizierung

Der Endenergiewert der TOP-Pellets ( $E_{TP}$ ) errechnet sich durch Multiplikation der Masse nach Torrefizierung und des HHV.

$$E_{TP} = m_{nT} * HHV$$

### 3.3.25 Energiedichte der TOP-Pellets nach Torrefizierung

Die Energiedichte der TOP-Pellets ( $\rho_{TP}$ ) errechnet sich durch Division des Endenergiewertes der TOP-Pellets ( $E_{TP}$ ) durch die Masse nach Torrefizierung ( $m_{nT}$ ).

$$\rho_{TP} = \frac{E_{TP}}{m_{nT}}$$

### 3.3.26 Kettenkostenberechnung pro GJ

Die Gesamtkosten der Biomasseversorgungskette pro GJ wird mittels Division der Versorgungskettenkosten ( $\sum K$ ) durch die Multiplikation von Endvolumen ( $V_{end}$ ) und Enddichte ( $\rho_{end}$ ) berechnet.

$$K_{end} = \frac{\sum K}{V_{end} * \rho_{end}}$$

## 4 Ergebnisse

Für die Berechnungen werden immer die Niederlande als Zielland herangezogen. Als Ausgangsländer werden Kanada, Lateinamerika und Skandinavien ausgewählt, um unterschiedlich große Transportdistanzen darstellen zu können.

### 4.1 Berechnung mit Variation der TOP- und Pelletierungsstandorte

#### 4.1.1 Berechnung mittels TOP und Pelletierung im Hafen

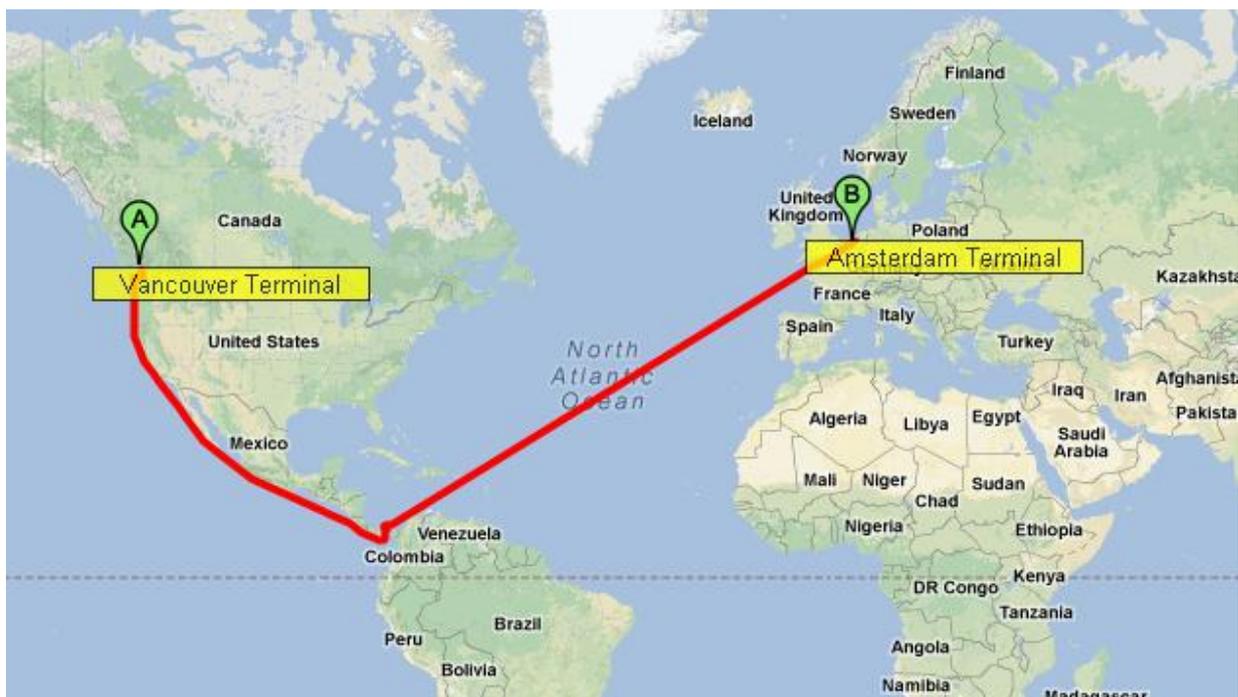
Für den ersten Fall werden drei Ausgangsversorgungsketten in Tabelle 4.1 definiert. Als Feedstock werden composite residue logs mit einer Menge von 100.000 Tonnen angenommen. Als Zielland dienen die Niederlande. Für den Landtransport werden dieselben Transportmittel und Distanzen angenommen. Einzig im Schifftransport gibt es den Unterschied, dass für den Transport von Skandinavien in die Niederlande kleinere Schiffe verwendet werden. Die für die Kostenberechnung verwendeten Werte sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen.

**Tabelle 4.1** Definierte Ausgangsversorgungsketten

<b>Kanada - Niederlande</b>	<b>Lateinamerika - Niederlande</b>	<b>Skandinavien - Niederlande</b>
120.000t composite residues logs		
Lagerung 50 Tage	Lagerung 50 Tage	Lagerung 50 Tage
50km LKW	50km LKW	50km LKW
500km Zug	500km Zug	500km Zug
Pelletierung bzw. TOP	Pelletierung bzw. TOP	Pelletierung bzw. TOP
16.535km Panamax	11.000km Panamax	1.100km small vessel
75km LKW	75km LKW	75km LKW

**Tabelle 4.2** Angenommene Kosten, Kapazitäten und Energiedichte für die Versorgungsketten

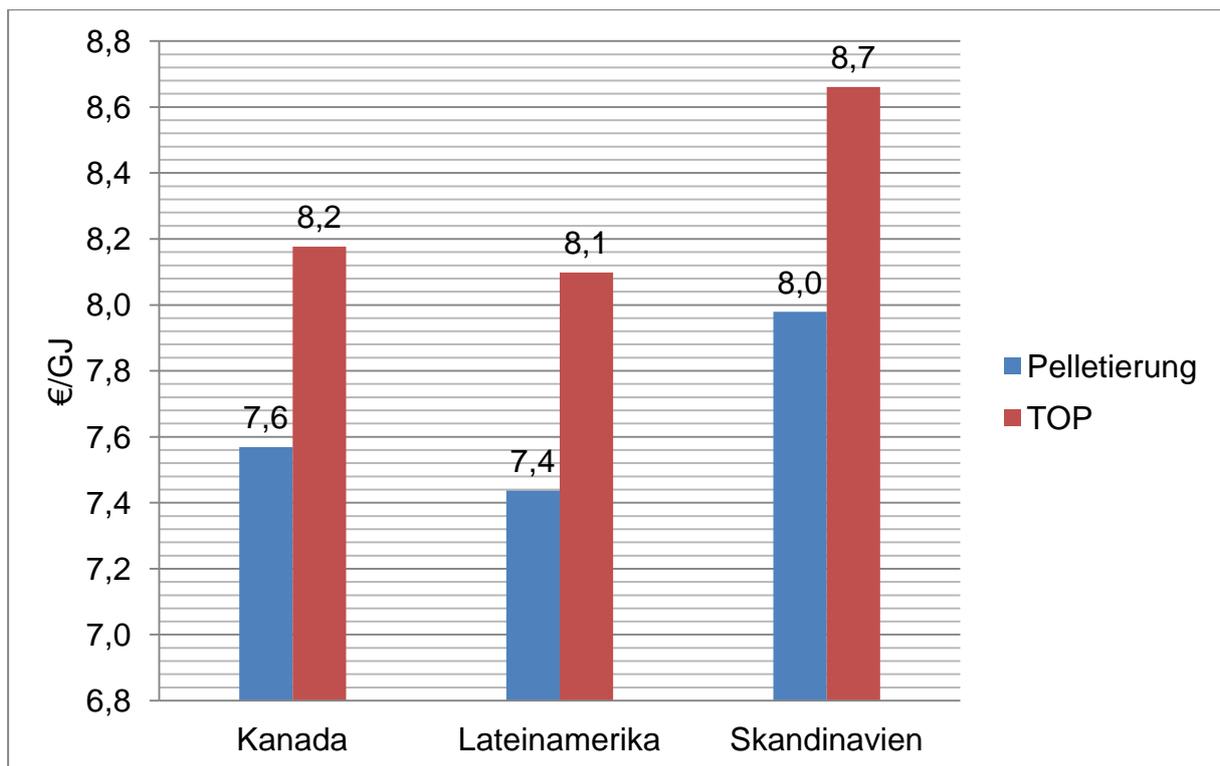
	Kosten	Gewichtskapazität	Volumenkapazität	Energiedichte HHV
composite residue logs	17,4 [€/t]	-	-	20,8 [GJ/t]
Freiluftlagerung 1 Jahr	1,1 [€/m <sup>3</sup> ]	-	-	-
Pelletierung	41 [€/t]	22,6 [t/h]	-	-
TOP	45 [€/t]	22,6 [t/h]	-	-
Schiff Panamax	16,187 [€/km]	63.000 [t]	105.000 [m <sup>3</sup> ]	-
Schiff small vessel	16,034 [€/km]	4.000 [t]	6700 [m <sup>3</sup> ]	-
Zug	Elektrizitätskosten 0,1 [€/kWh]	1.000 [t]	2.500 [m <sup>3</sup> ]	-
LKW	1,1 [€/km]	40 [t]	130 [m <sup>3</sup> ]	-



**Abb. 4.1** Schiffsrouten von Westkanada in die Niederlande von <http://www.searates.com/reference/portdistance/>

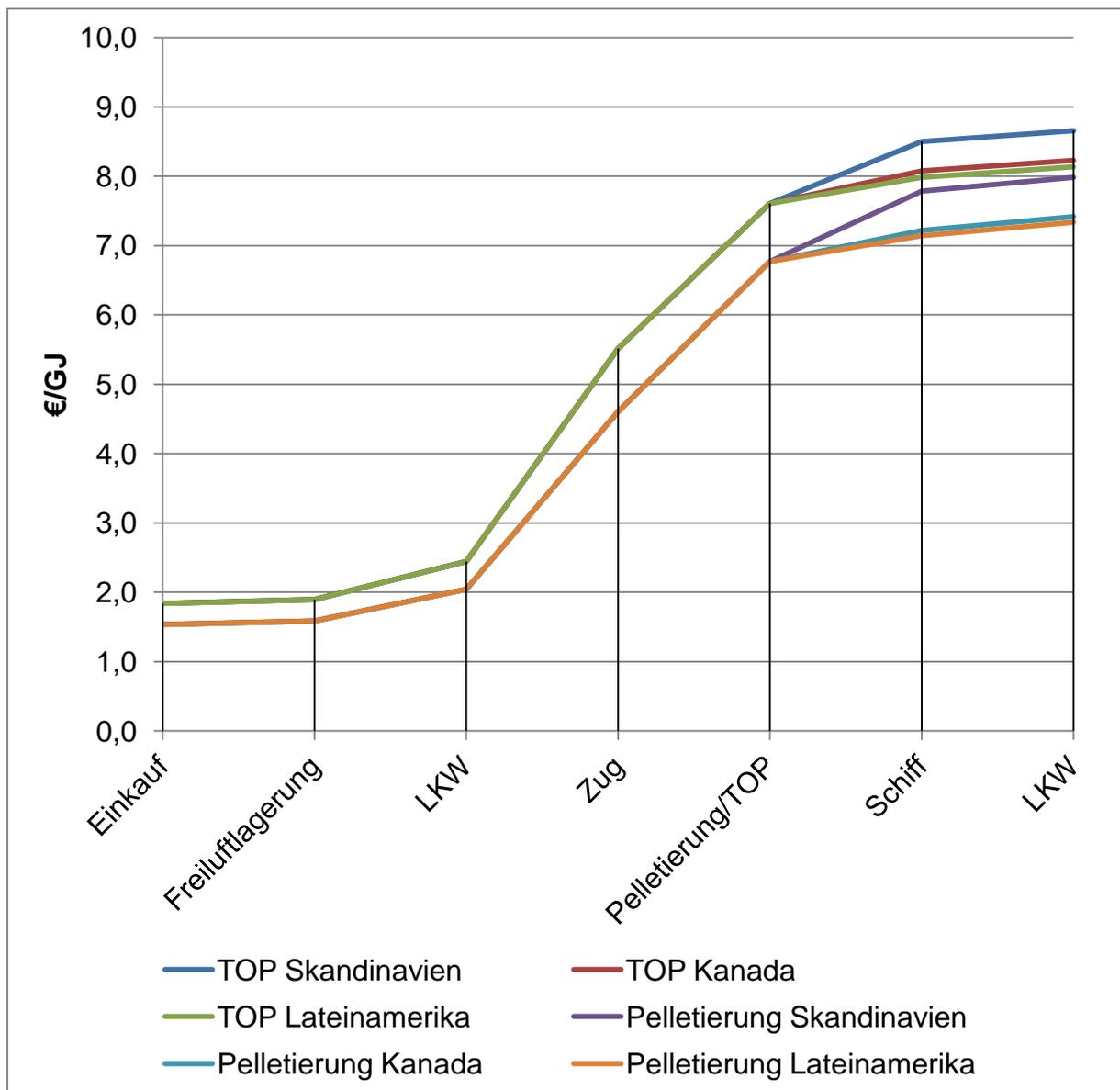
In Abb. 4.1 findet man die Schiffstransportroute von Kanada in die Niederlande grafisch dargestellt.

#### 4.1.1.1 Kostenvergleich der 3 Ausgangsversorgungsketten



**Abb. 4.2** Kostenvergleich von Biomasse für die 3 Ausgangsversorgungsketten in die Niederlande

Wenn für alle 3 Versorgungsketten bis auf den Schiffstransport dieselben Distanzen und für Skandinavien andere Schiffstypen verwendet werden, ist der Preis für TOP-Pellets aus allen Ländern höher als für herkömmliche Pellets. Dies ist in Abb. 4.2 und Tabelle 4.3 erkennbar.



**Abb. 4.3** Kettenkostenvergleich von Biomasse für 3 Ausgangsversorgungsketten in die Niederlande

Im Gegensatz zum Säulendiagramm in Abb. 4.2 sind in Abb. 4.3 zusätzlich die summierten Kosten im Laufe der Biomasseversorgungskette ersichtlich. So ist unter anderem der große Unterschied der Schiffstransportkosten von Skandinavien in die Niederlande, im Vergleich zu den Transporten aus Kanada und Lateinamerika ersichtlich. In weiterer Folge erkennt man, dass in Abb. 4.3 der Preisunterschied von Pellets und TOP-Pellets aus Skandinavien, gegenüber jenen aus Kanada und Lateinamerika relativ hoch. Dies ist auf den höheren Schiffstransportpreis zurückzuführen. Nichts desto trotz sind die günstigsten TOP-Pellets aus Lateinamerika mit 8,1€/GJ noch immer teurer als Pellets aus Skandinavien mit einem Preis von 8,0€/GJ.

**Tabelle 4.3** Akkumulierte Kosten der Ausgangsversorgungsketten in €/GJ

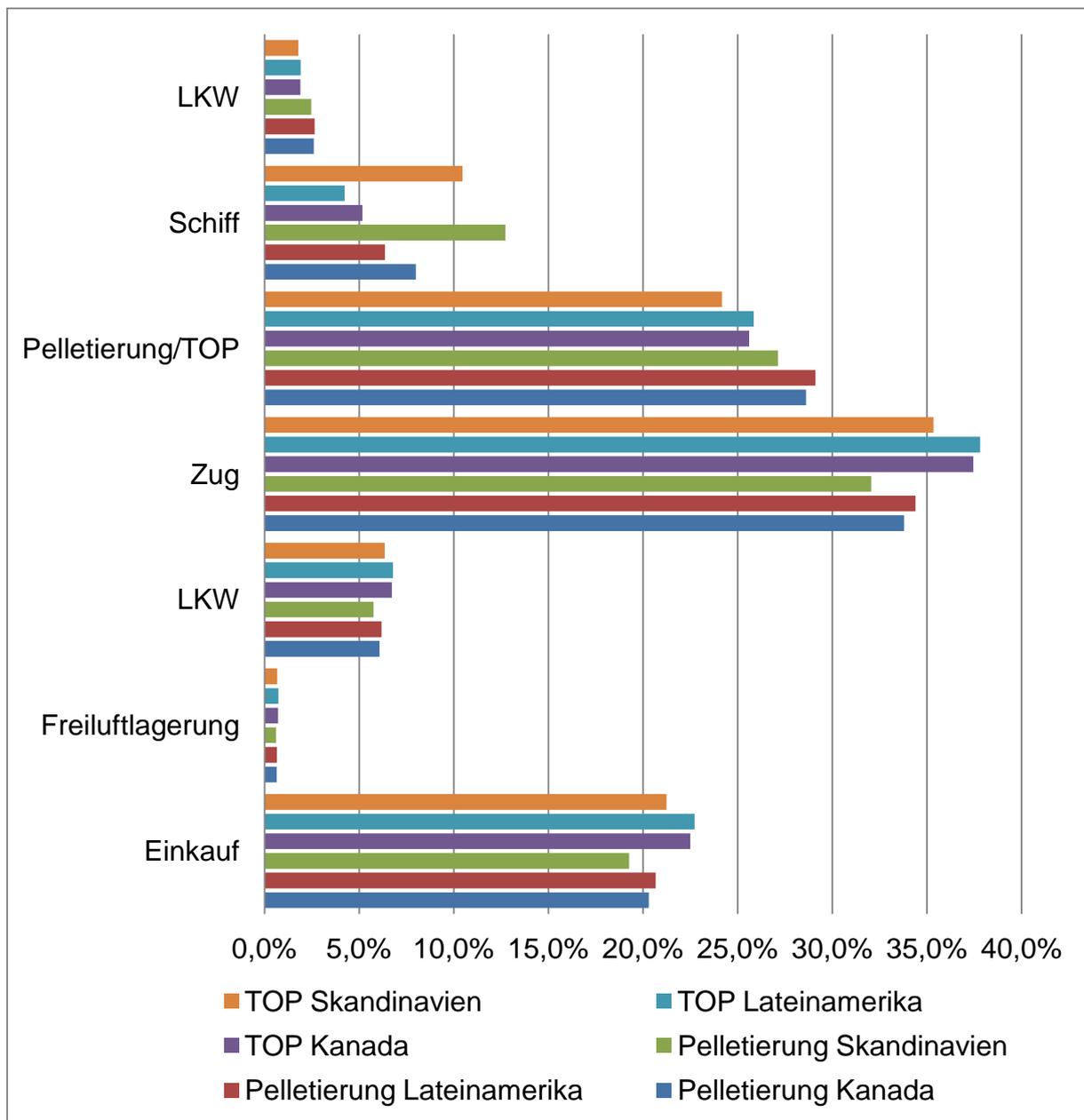
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,4	7,6
Pelletierung Lateinamerika	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,2	7,4
Pelletierung Skandinavien	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,8	8,0
TOP Kanada	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,0	8,2
TOP Lateinamerika	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	7,9	8,1
TOP Skandinavien	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,5	8,7

Tabelle 4.3 zeigt die akkumulierten Kosten der drei Ausgangsversorgungsketten für die einzelnen Kettenschritte.

Tabelle 4.4 zeigt die Einzelkosten der drei Ausgangsversorgungsketten für die einzelnen Kettenschritte. Auch hier sind die hohen Schiffstransportkosten für Pellets aus Skandinavien mit 1,0€/GJ im Gegensatz zu Pellets aus Kanada mit 0,6€/GJ ersichtlich.

**Tabelle 4.4** Einzelkosten der drei Ausgangsversorgungsketten in €/GJ

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	0,6	0,2
Pelletierung Lateinamerika	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	0,5	0,2
Pelletierung Skandinavien	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	1,0	0,2
TOP Kanada	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,4	0,2
TOP Lateinamerika	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,3	0,2
TOP Skandinavien	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,9	0,2



**Abb. 4.4** Einzelkosten der Ausgangsversorgungsketten in Prozent

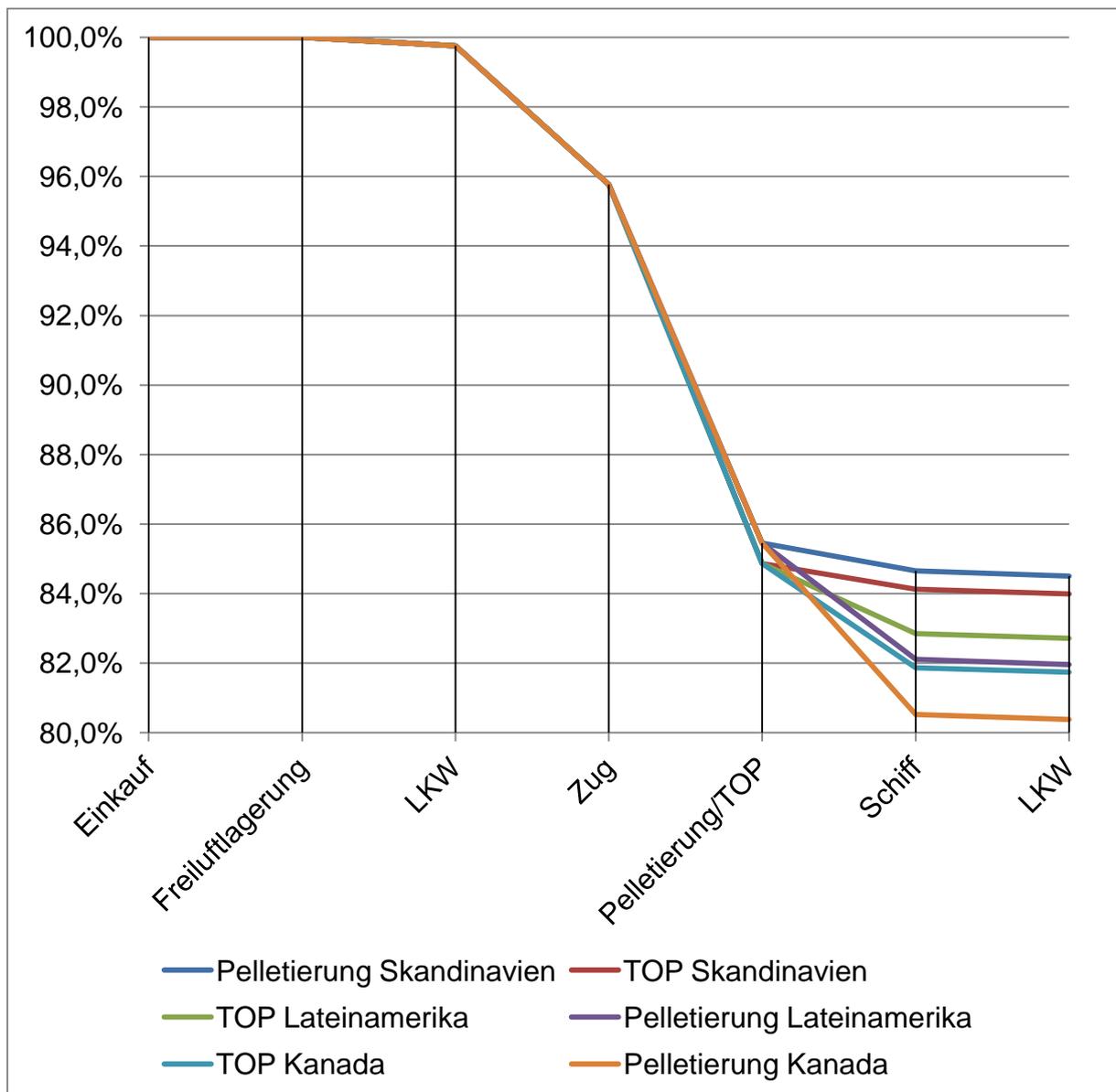
Wie in Abb. 4.4 ersichtlich, werden zwischen 24,2% und 29,2% der Kettenkosten von der Verarbeitung verursacht. Der Zugtransport nimmt mit Werten zwischen 32,0% und 37,6% ebenfalls einen hohen Kostenanteil ein. Eine genauere Auflistung der Einzelkosten findet man in Tabelle 4.5.

**Tabelle 4.5** Einzelkosten der Ausgangsversorgungsketten in Prozent

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	20,3%	0,6%	6,1%	33,8%	28,6%	8,0%	2,6%
Pelletierung Lateinamerika	20,7%	0,7%	6,2%	34,4%	29,1%	6,4%	2,6%
Pelletierung Skandinavien	19,3%	0,6%	5,8%	32,1%	27,1%	12,7%	2,5%
TOP Kanada	22,5%	0,7%	6,7%	37,4%	25,6%	5,2%	1,9%
TOP Lateinamerika	22,7%	0,7%	6,8%	37,8%	25,8%	4,2%	1,9%
TOP Skandinavien	21,2%	0,7%	6,3%	35,3%	24,2%	10,5%	1,8%

#### 4.1.1.2 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung im Hafen

Der Transport und die Verarbeitung der Biomasse benötigt Energie, welche unwiederbringlich verloren ist. Dies wird in Abb. 4.5 grafisch dargestellt. Die in Tabelle 4.6 dargestellten Werte, zeigen die im Zuge der Biomasseversorgungskette benötigte Energie, welche direkt vom Gesamtenergiewert des Endprodukts subtrahiert wird. Im Gegensatz zu den Kosten ist hier sowohl bei der Pelletierung als auch bei der TOP, aufgrund der kürzeren Transportdistanz die Strecke von Skandinavien in die Niederlande am energieeffizientesten. Der Energiebedarf für Be- und Entladung der Transportfahrzeuge wurde in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.



**Abb. 4.5** Energiebedarf der 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit Verarbeitung im Hafen

**Tabelle 4.6** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Ausgangsversorgungsketten in Prozent

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	84,7%	84,5%
TOP Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	84,1%	84,0%
TOP Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	82,8%	82,7%
Pelletierung Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	82,1%	82,0%
TOP Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	81,9%	81,7%
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	80,5%	80,4%

Die Energiebereitstellungseffizienz liegt bei den Versorgungsketten mit TOP-Pellets immer über jener von herkömmlichen Pellets. Je geringer die Transportdistanz, desto höher ist die Energiebereitstellungseffizienz. Pellets aus Kanada und Lateinamerika sind somit aufgrund des Schifftransports ökologisch am wenig sinnvollsten (ersichtlich in Tabelle 4.6).

**Tabelle 4.7** Benötigte Energie für jeden Versorgungskettenschritt der Ausgangsversorgungsketten in Prozent

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	89,2%	94,2%	99,8%
Pelletierung Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	89,2%	96,1%	99,8%
Pelletierung Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	89,2%	99,1%	99,8%
TOP Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	88,6%	96,5%	99,8%
TOP Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	88,6%	97,6%	99,8%
TOP Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	96,0%	88,6%	99,1%	99,8%

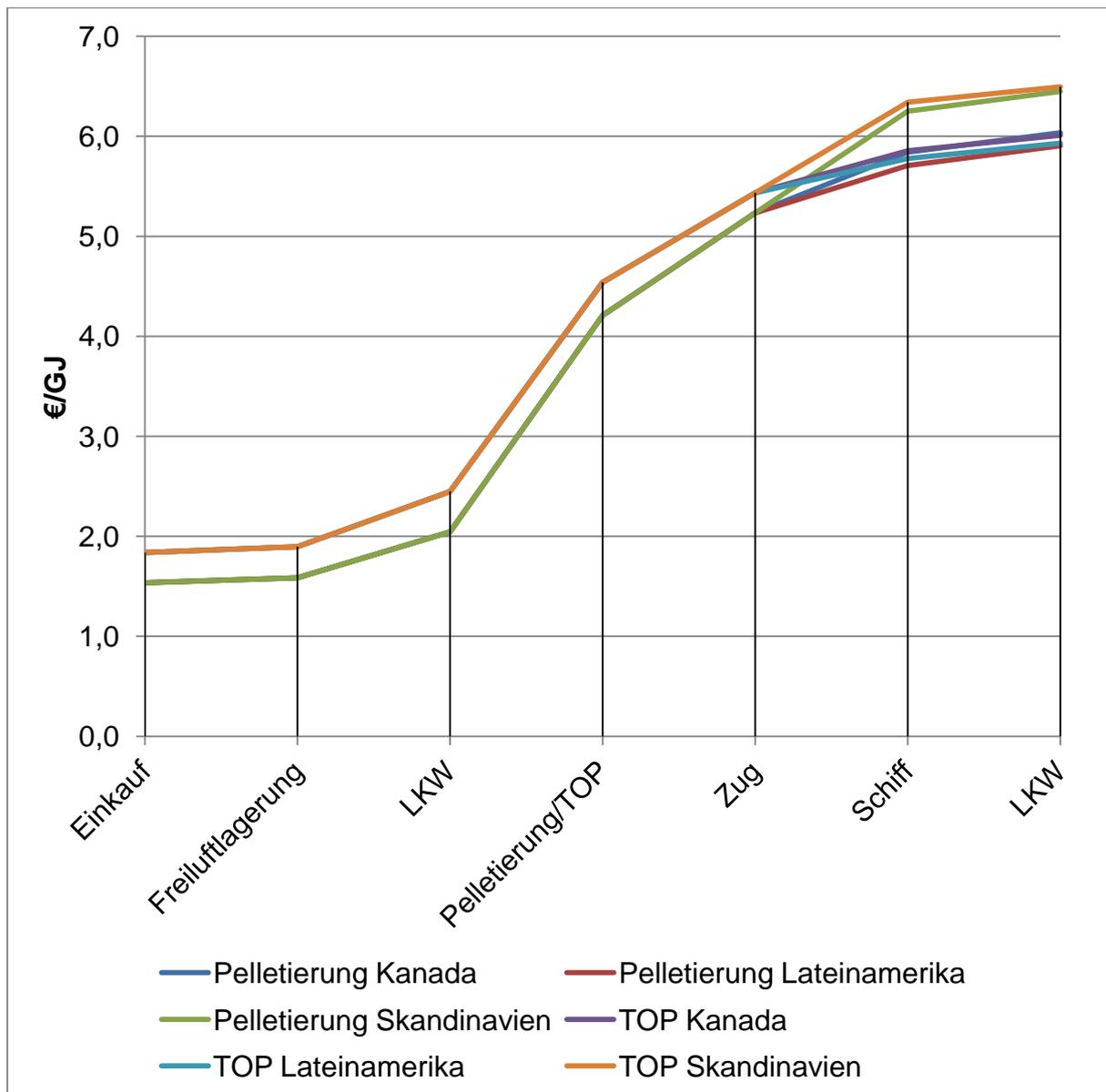
---

Auffällig ist die geringere Energiebereitstellungseffizienz, gegeben durch den prozentuellen Verlust der gelieferten Energiemenge bei der TOP (88,6%) gegenüber der Pelletierung (89,2%). Des weiteren hat der Langstreckentransport mittels Schiff von Pellets mit bis zu 94,2% Energiebereitstellungseffizienz, gegenüber den von TOP-Pellets mit bis zu 96,5% Energiebereitstellungseffizienz, einen höheren Energiebedarf (ersichtlich in Tabelle 4.7).

#### 4.1.2 Berechnung mittels TOP und Pelletierung im Holzschlägerungsgebiet

In diesem Fall wird untersucht, welche Auswirkungen die Produktion des Endprodukts im Holzschlägerungsgebiet hat. Hierbei wird ein Transportradius von 50 km mittels LKW angenommen. Nach der Pelletierung bzw. TOP wird das Produkt 500km mittels Zug zum Hafen und weiter mittels Schiff in die Niederlande transportiert. Hier erfolgt der Endtransport (über 75km) mit Hilfe eines LKW.

##### 4.1.2.1 Kostenvergleich bei Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet



**Abb. 4.6** Kettenkostenvergleich von Biomasse in die Niederlande mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet

**Tabelle 4.8** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet

	Einkauf	Lagerung	LKW	Pelletierung/ TOP	Zug	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2,0	4,2	5,2	5,8	6,0
Pelletierung Lateinamerika	1,5	1,6	2,0	4,2	5,2	5,7	5,9
Pelletierung Skandinavien	1,5	1,6	2,0	4,2	5,2	6,3	6,4
TOP Kanada	1,8	1,9	2,4	4,5	5,4	5,9	6,0
TOP Lateinamerika	1,8	1,9	2,4	4,5	5,4	5,8	5,9
TOP Skandinavien	1,8	1,9	2,4	4,5	5,4	6,3	6,5

Durch die Produktion von Pellets und TOP-Pellets direkt vor Ort, werden die Transportkosten in der Biomasseversorgungskette gesenkt. Der Höchstpreis liegt nun für Pellets aus Skandinavien bei 6,4€/GJ und TOP-Pellets bei 6,5€/GJ (ersichtlich in Tabelle 4.8, Tabelle 4.9 und Tabelle 4.10). Auch hier liegen die höheren Kosten für die beiden Produkte aus Skandinavien darin begründet, dass der Schiffstransport hohe Kosten verursacht.

**Tabelle 4.9** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet

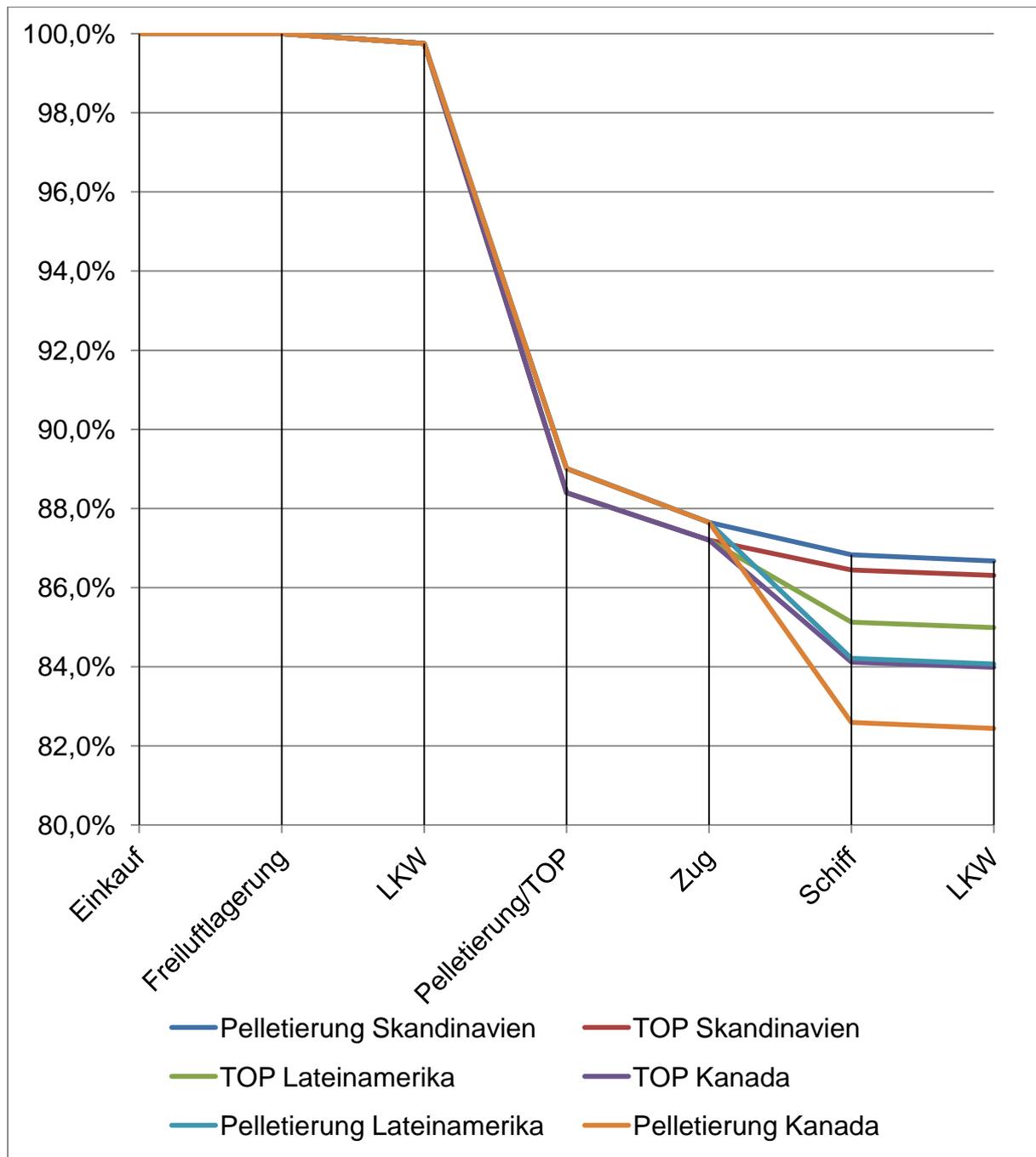
	Einkauf	Lagerung	LKW	Pelletierung/ TOP	Zug	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	0,0	0,5	2,2	1,0	0,6	0,2
Pelletierung Lateinamerika	1,5	0,0	0,5	2,2	1,0	0,5	0,2
Pelletierung Skandinavien	1,5	0,0	0,5	2,2	1,0	1,0	0,2
TOP Kanada	1,8	0,1	0,5	2,1	0,9	0,4	0,2
TOP Lateinamerika	1,8	0,1	0,5	2,1	0,9	0,3	0,2
TOP Skandinavien	1,8	0,1	0,5	2,1	0,9	0,9	0,2

**Tabelle 4.10** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet

	Einkauf	Lagerung	LKW	Pelletierung/ TOP	Zug	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	25,5%	0,8%	7,6%	35,9%	17,0%	10,0%	3,3%
Pelletierung Lateinamerika	26,0%	0,8%	7,8%	36,7%	17,4%	8,0%	3,3%
Pelletierung Skandinavien	23,8%	0,8%	7,1%	33,6%	15,9%	15,7%	3,1%
TOP Kanada	30,6%	1,0%	9,1%	34,8%	14,9%	7,0%	2,6%
TOP Lateinamerika	31,0%	1,0%	9,3%	35,3%	15,1%	5,8%	2,6%
TOP Skandinavien	28,3%	0,9%	8,5%	32,2%	13,8%	13,9%	2,4%

#### 4.1.2.2 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet

Durch die vorzeitige Verarbeitung der Biomasse im Holzschlägerungsgebiet erhöht sich die Energiebereitstellungseffizienz (ersichtlich in Abb. 4.6).



**Abb. 4.7** Energiebereitstellungseffizienz der 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet

Die Energiebereitstellungseffizienz ist auch hier für Pellets aus Skandinavien mit 86,7% am höchsten (ersichtlich in Tabelle 4.11). Die Verarbeitung im Holzschlägerungsgebiet hat auch auf alle anderen Biomasseversorgungsketten einen positiven Einfluss auf die Energiebereitstellungseffizienz.

**Tabelle 4.11** Prozentueller Energiewert des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent mit Produktion des Endprodukts im Produktionsgebiet

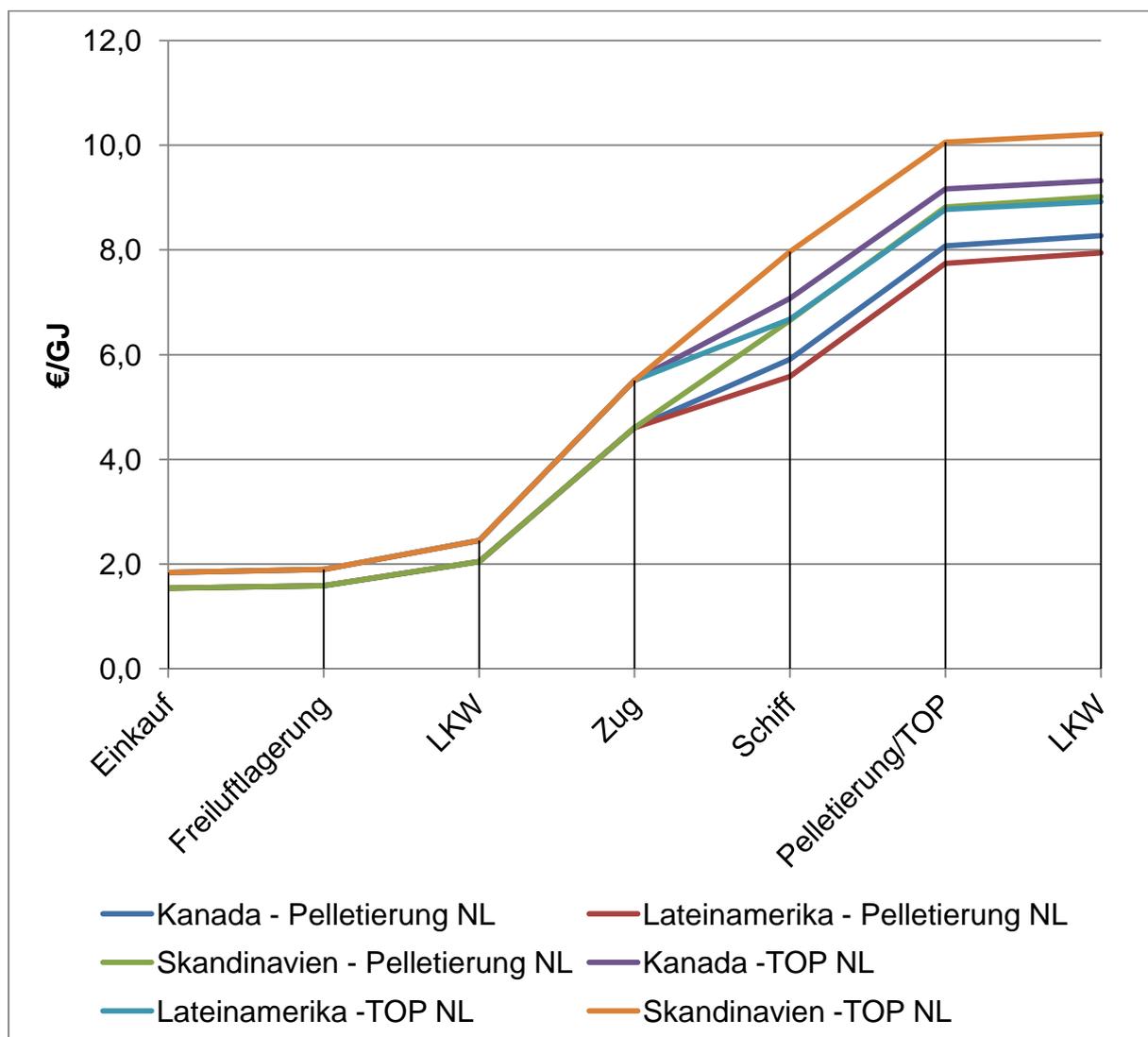
	Einkauf	Lagerung	LKW	Pelletierung/ TOP	Zug	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	89,0%	87,6%	82,6%	82,4%
Pelletierung Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	89,0%	87,6%	84,2%	84,1%
Pelletierung Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	89,0%	87,6%	86,8%	86,7%
TOP Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	88,4%	87,2%	84,1%	84,0%
TOP Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	88,4%	87,2%	85,1%	85,0%
TOP Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	88,4%	87,2%	86,4%	86,3%

### 4.1.3 Berechnung mittels TOP und Pelletierung in den Niederlanden

In diesem Fall wird untersucht, welche Auswirkungen der Rohmaterialtransport in das Zielland mit anschließender Pelletierung bzw. Torrefizierung auf die Kosten und die Energiebereitstellungseffizienz der Biomasseversorgungskette hat.

#### 4.1.3.1 Kostenvergleich bei Verarbeitung in den Niederlanden mit unterschiedlichen Schiffstypen

Gegenüber den Ausgangsversorgungsketten, wird die Biomasse im Rohzustand in die Niederlande transportiert und erst hier zu Pellets bzw. TOP-Pellets verarbeitet. Alle anderen Parameter werden nicht verändert.



**Abb. 4.8** Kettenkostenvergleich von Biomasse für 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

Durch die Verlagerung des Produktionsstandorts in die Niederlande, erhöhen sich die Kosten für das Endprodukt dramatisch (ersichtlich in Abb. 4.8). Wie Tabelle 4.12, Tabelle 4.13 und Tabelle 4.14 zu entnehmen ist, sind die Transportkosten in die Niederlande gegenüber jenen die in Kapitel 4.1.1 und Kapitel 4.1.2 ermittelt wurden deutlich gestiegen.

**Tabelle 4.12** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	5,9	8,1	8,3
Lateinamerika - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	5,6	7,7	7,9
Skandinavien - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	6,7	8,8	9,0
Kanada - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	7,1	9,2	9,3
Lateinamerika - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	6,7	8,8	8,9
Skandinavien - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	8,0	10,1	10,2

**Tabelle 4.13** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

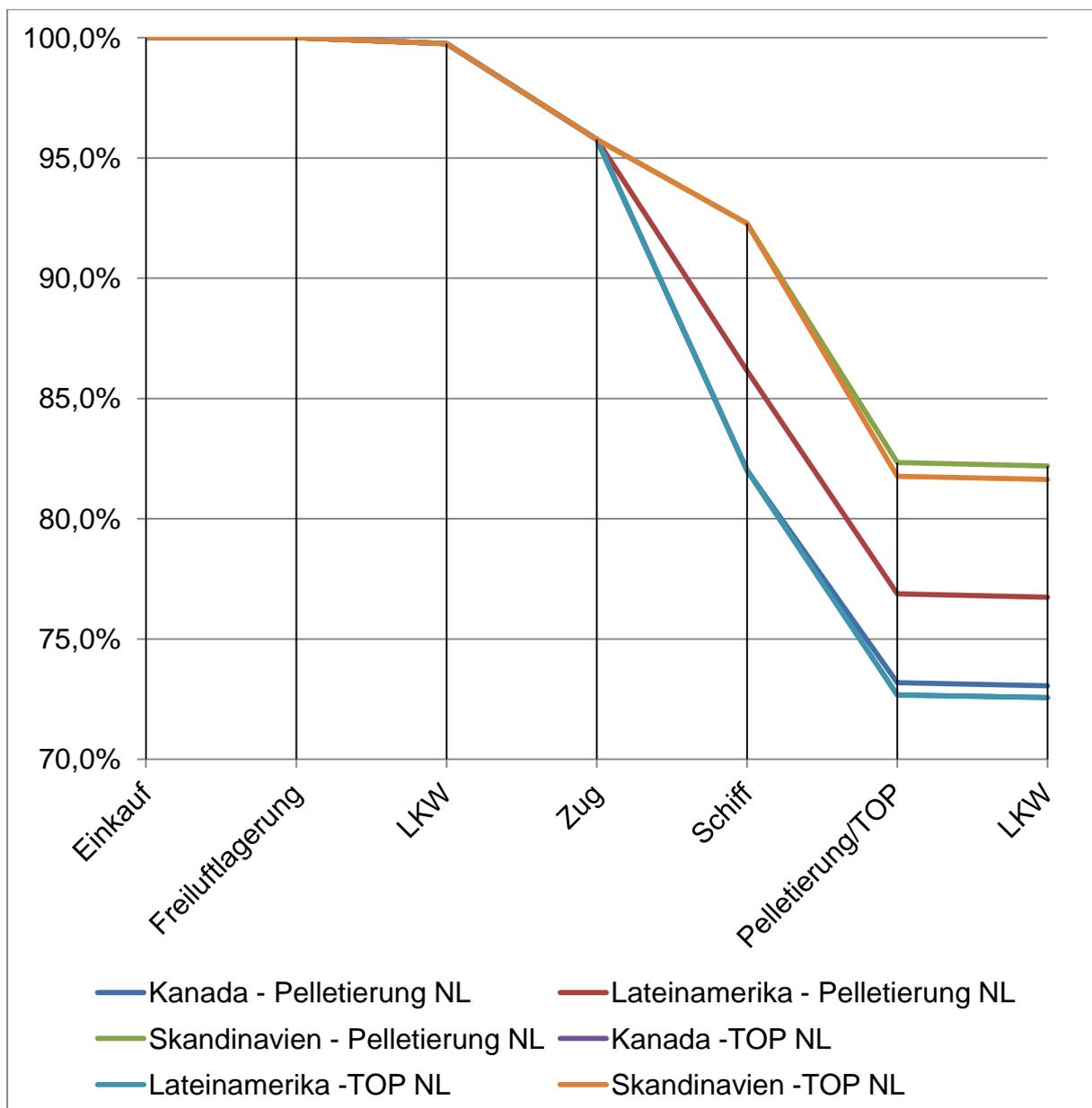
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	1,3	2,2	0,2
Lateinamerika - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	1,0	2,2	0,2
Skandinavien - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	2,1	2,2	0,2
Kanada - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	1,6	2,1	0,2
Lateinamerika - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	1,2	2,1	0,2
Skandinavien - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	2,5	2,1	0,2

**Tabelle 4.14** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	18,6%	0,6%	5,5%	30,9%	15,8%	26,2%	2,4%
Lateinamerika - Pelletierung NL	19,3%	0,6%	5,8%	32,2%	12,3%	27,3%	2,5%
Skandinavien - Pelletierung NL	17,0%	0,5%	5,1%	28,4%	22,8%	24,0%	2,2%
Kanada - TOP NL	20,6%	0,7%	6,2%	34,3%	17,5%	23,4%	1,7%
Lateinamerika - TOP NL	20,6%	0,7%	6,2%	34,3%	13,1%	23,4%	1,7%
Skandinavien - TOP NL	18,0%	0,6%	5,4%	30,0%	24,1%	20,5%	1,5%

#### 4.1.3.2 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit unterschiedlichen Schiffstypen

Der Transport von nicht verarbeiteter Biomasse hat negative Auswirkungen auf die Energiebereitstellungseffizienz. Unverarbeitete Biomasse hat im Gegensatz zu Pellets bzw. TOP-Pellets eine wesentlich geringere Energiedichte und somit ein höheres Gewicht als auch ein größeres Volumen. Dadurch steigt die Anzahl der notwendigen Transportmittel.



**Abb. 4.9** Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit unterschiedlichen Schiffstypen

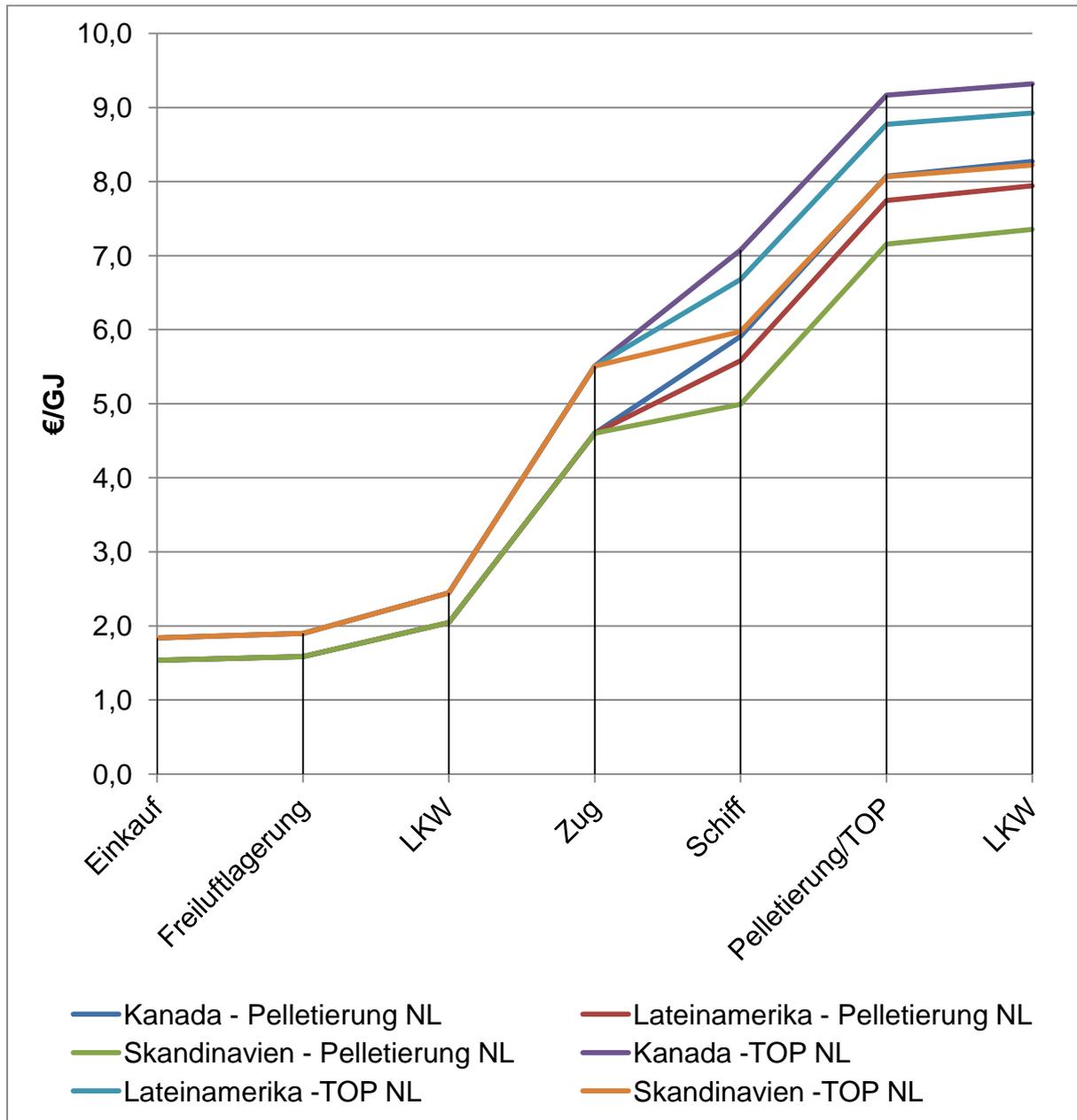
Ebenso hat die Verlagerung des Produktionsstandorts in die Niederlande, negative Auswirkungen auf die Energiebereitstellungseffizienz. Wie in Abb. 4.9 und Tabelle 4.15 ersichtlich, haben nur mehr TOP-Pellets und herkömmliche Pellets für welche die Biomasse aus Skandinavien importiert wurde, eine Energiebereitstellungseffizienz von über 80%.

**Tabelle 4.15** Prozentuelle Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent bei Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	82,0%	73,2%	73,0%
Lateinamerika - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	86,2%	76,9%	76,7%
Skandinavien - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	92,3%	82,3%	82,2%
Kanada - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	82,0%	72,7%	72,6%
Lateinamerika - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	82,0%	72,7%	72,6%
Skandinavien - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	92,3%	81,8%	81,6%

#### 4.1.3.3 Kostenvergleich bei Verarbeitung in den Niederlanden mit identischen Schiffstypen

Im Gegensatz zu 4.1.3.1 Kostenvergleich bei Verarbeitung in den Niederlanden mit unterschiedlichen Schiffstypen, wird für die Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande ebenfalls der Schiffstyp Panamax verwendet. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich aller Versorgungsketten mit identischen Transportmitteln.



**Abb. 4.10** Kettenkostenvergleich für Biomasse für 3 Versorgungsketten in die Niederlande mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

Wie in Abb. 4.10 ersichtlich sind nun Pellets und TOP-Pellets welche in den Niederlanden produziert werden und für welche die Biomasse aus Skandinavien importiert wird am kostengünstigsten.

**Tabelle 4.16** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	5,9	8,1	8,3
Lateinamerika - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	5,6	7,7	7,9
Skandinavien - Pelletierung NL	1,5	1,6	2,0	4,6	5,0	7,2	7,4
Kanada - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	7,1	9,2	9,3
Lateinamerika - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	6,7	8,8	8,9
Skandinavien - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	6,0	8,1	8,2

**Tabelle 4.17** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit gleichen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	1,3	2,2	0,2
Lateinamerika - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	1,0	2,2	0,2
Skandinavien - Pelletierung NL	1,5	0,0	0,5	2,6	0,4	2,2	0,2
Kanada - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	1,6	2,1	0,2
Lateinamerika - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	1,2	2,1	0,2
Skandinavien - TOP NL	1,8	0,1	0,5	3,1	0,5	2,1	0,2

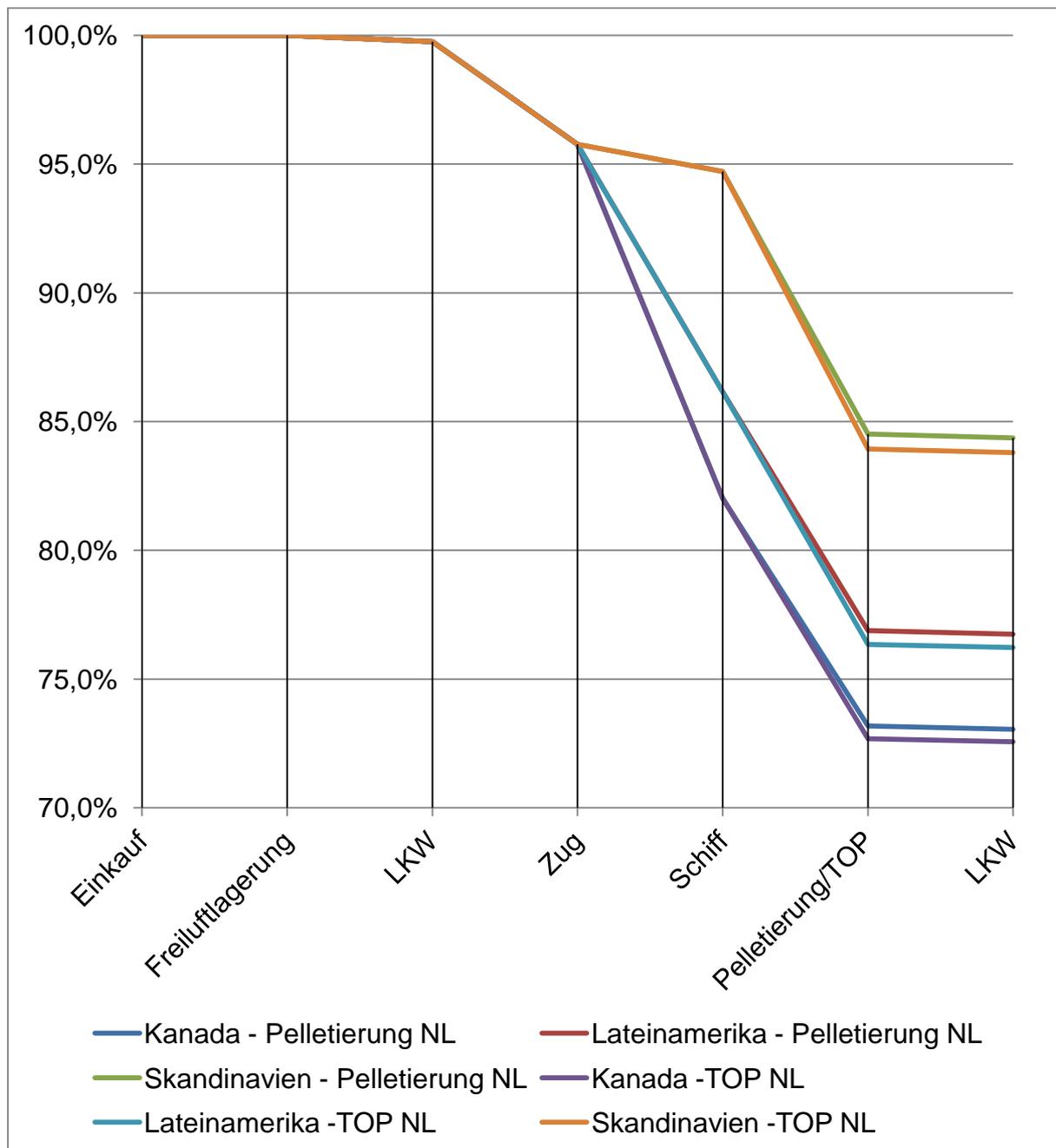
Wie aus Tabelle 4.16, Tabelle 4.17 und Tabelle 4.18 ersichtlich ist, führt die Verwendung des gleichen Schiffstyps für alle Versorgungsketten dazu, dass Pellets, für welche die Biomasse aus Skandinavien in die Niederlande transportiert wird, in diesem Beispiel am kostengünstigsten sind.

**Tabelle 4.18** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit identischen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	18,6%	0,6%	5,5%	30,9%	15,8%	26,2%	2,4%
Lateinamerika - Pelletierung NL	19,3%	0,6%	5,8%	32,2%	12,3%	27,3%	2,5%
Skandinavien - Pelletierung NL	20,9%	0,7%	6,2%	34,8%	5,3%	29,4%	2,7%
Kanada - TOP NL	20,6%	0,7%	6,2%	34,3%	17,5%	23,4%	1,7%
Lateinamerika - TOP NL	20,6%	0,7%	6,2%	34,3%	13,1%	23,4%	1,7%
Skandinavien - TOP NL	22,4%	0,7%	6,7%	37,2%	5,7%	25,5%	1,9%

#### 4.1.3.4 Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit identischen Schiffstypen

Wie in Abb. 4.11 ersichtlich, führt die Verwendung von identischen Schiffstypen auch hinsichtlich der Energiebereitstellungseffizienz für Pellets und TOP-Pellets, welche in den Niederlanden produziert werden und für welche die Biomasse aus Skandinavien importiert wird, zu einer deutlichen Verbesserung.



**Abb. 4.11** Energiebereitstellungseffizienz bei Verarbeitung in den Niederlanden mit identischen Schiffstypen

Ökologisch betrachtet, sind TOP-Pellets und Pellets mit Biomasse aus Skandinavien, jenen aus Kanada und Lateinamerika vorzuziehen. Die Energiebereitstellungseffizienz beträgt für TOP-Pellets aus Biomasse von Skandinavien 83,8% und für TOP-Pellets aus Biomasse von Kanada lediglich 72,6% (ersichtlich in Tabelle 4.19).

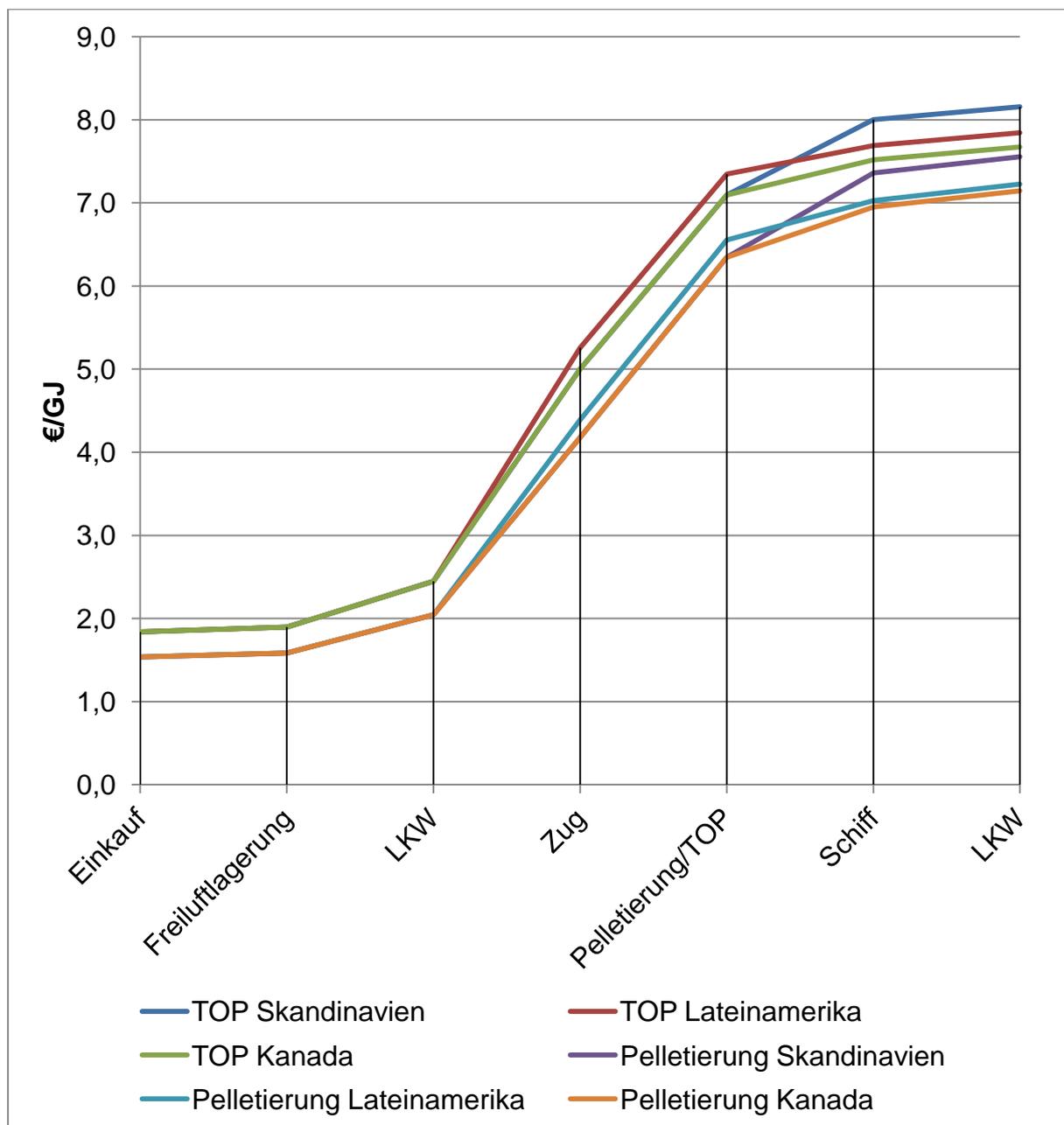
**Tabelle 4.19** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette in Prozent mit identischen Schiffstypen und Pelletierung bzw. TOP in den Niederlanden

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Kanada - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	82,0%	73,2%	73,0%
Lateinamerika - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	86,2%	76,9%	76,7%
Skandinavien - Pelletierung NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	94,7%	84,5%	84,4%
Kanada - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	82,0%	72,7%	72,6%
Lateinamerika - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	86,2%	76,3%	76,2%
Skandinavien - TOP NL	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	94,7%	83,9%	83,8%

## 4.2 Berechnung mit variierten Transportkosten

### 4.2.1 Berechnung mittels veränderter Zugtransportkosten

In diesem Fall wird untersucht, welche Auswirkungen die Stromkosten im jeweiligen Ausgangsland auf den Transport mittels Zug und in weiterer Folge auf das Endprodukt hat. Für Kanada wird der Preis auf 0,06 Cent, für Lateinamerika 0,08 Cent und für Skandinavien 0,06 Cent pro kWh festgelegt. Die übrigen Werte für die Berechnung werden wie in 4.1.1 angenommen.



**Abb. 4.12** Kettenkostenvergleich für Biomasse in die Niederlande mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport

**Tabelle 4.20** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2,0	4,2	6,3	6,9	7,1
Pelletierung Lateinamerika	1,5	1,6	2,0	4,4	6,6	7,0	7,2
Pelletierung Skandinavien	1,5	1,6	2,0	4,2	6,3	7,4	7,6
TOP Kanada	1,8	1,9	2,4	5,0	7,1	7,5	7,7
TOP Lateinamerika	1,8	1,9	2,4	5,3	7,3	7,7	7,8
TOP Skandinavien	1,8	1,9	2,4	5,0	7,1	8,0	8,2

**Tabelle 4.21** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	0,0	0,5	2,1	2,2	0,6	0,2
Pelletierung Lateinamerika	1,5	0,0	0,5	2,3	2,2	0,5	0,2
Pelletierung Skandinavien	1,5	0,0	0,5	2,1	2,2	1,0	0,2
TOP Kanada	1,8	0,1	0,5	2,6	2,1	0,4	0,2
TOP Lateinamerika	1,8	0,1	0,5	2,8	2,1	0,3	0,2
TOP Skandinavien	1,8	0,1	0,5	2,6	2,1	0,9	0,2

Aufgrund der veränderten Strompreise, sind die Transportkosten in €/GJ des Endprodukts mittels Zug in Skandinavien und Kanada um 0,2 Cent billiger, als jene in Lateinamerika (ersichtlich in Tabelle 4.20 und Tabelle 4.21).

**Tabelle 4.22** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit veränderten Stromkosten für den Zugtransport

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	21,5%	0,7%	6,4%	29,9%	30,3%	8,5%	2,8%
Pelletierung Lateinamerika	21,3%	0,7%	6,4%	32,5%	30,0%	6,5%	2,7%
Pelletierung Skandinavien	20,3%	0,6%	6,1%	28,3%	28,6%	13,4%	2,6%
TOP Kanada	24,0%	0,8%	7,2%	33,3%	27,3%	5,5%	2,0%
TOP Lateinamerika	23,4%	0,7%	7,0%	35,8%	26,7%	4,4%	2,0%
TOP Skandinavien	22,6%	0,7%	6,7%	31,3%	25,7%	11,1%	1,9%

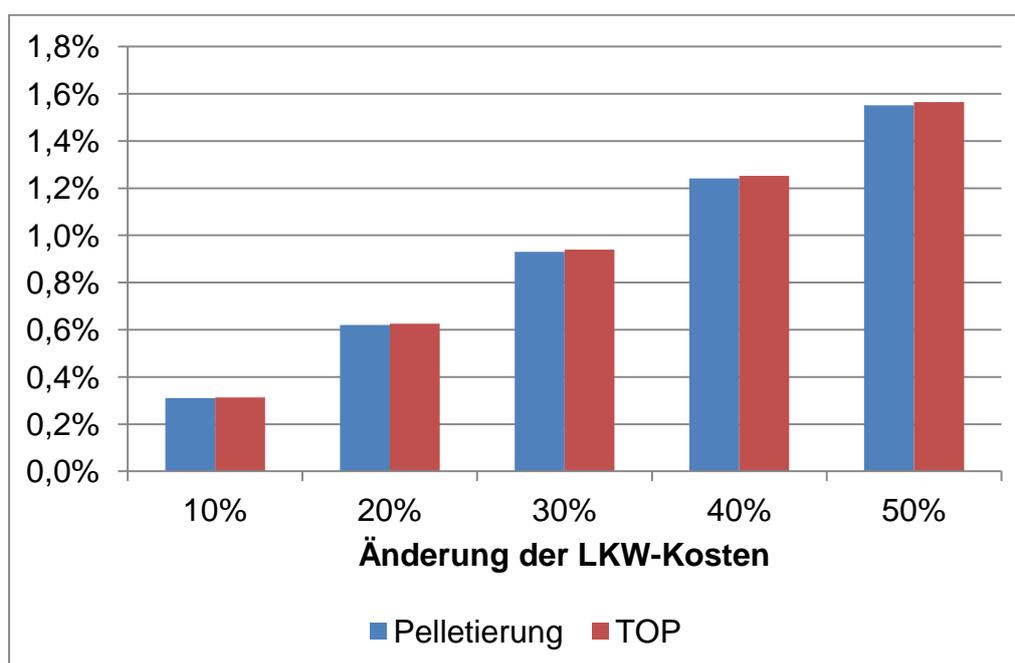
Gegenüber den in 4.1.1 ermittelten Ergebnissen, verringern sich die Zugtransportkosten. Diese liegen hier zwischen 28,3% und 35,8% (ersichtlich in Tabelle 4.22).

#### 4.2.2 Berechnung mittels veränderter LKW-Kosten

In diesem Fall wird untersucht, welche Auswirkungen veränderte LKW-Kosten auf das Endprodukt haben. Dies wird für die Versorgungskette von Kanada in die Niederlande untersucht. Die Distanzen und verwendeten Transportmittel, sowie das Ausgangsmaterial sind gegenüber 4.1.1 unverändert.

**Tabelle 4.23** Auswirkungen bezüglich einer Erhöhung der LKW-Kosten auf die Versorgungskette von Kanada in die Niederlande.

Erhöhung	LKW €/km	Kanada Pelletierung €/GJ	prozentuale Änderung	Kanada TOP €/GJ	prozentuale Änderung
0%	1,1	7,6	-	8,2	-
10%	1,21	7,6	0,3%	8,2	0,2%
20%	1,32	7,6	0,7%	8,2	0,6%
30%	1,43	7,6	0,9%	8,3	0,9%
40%	1,54	7,7	1,3%	8,3	1,2%
50%	1,65	7,7	1,6%	8,3	1,6%



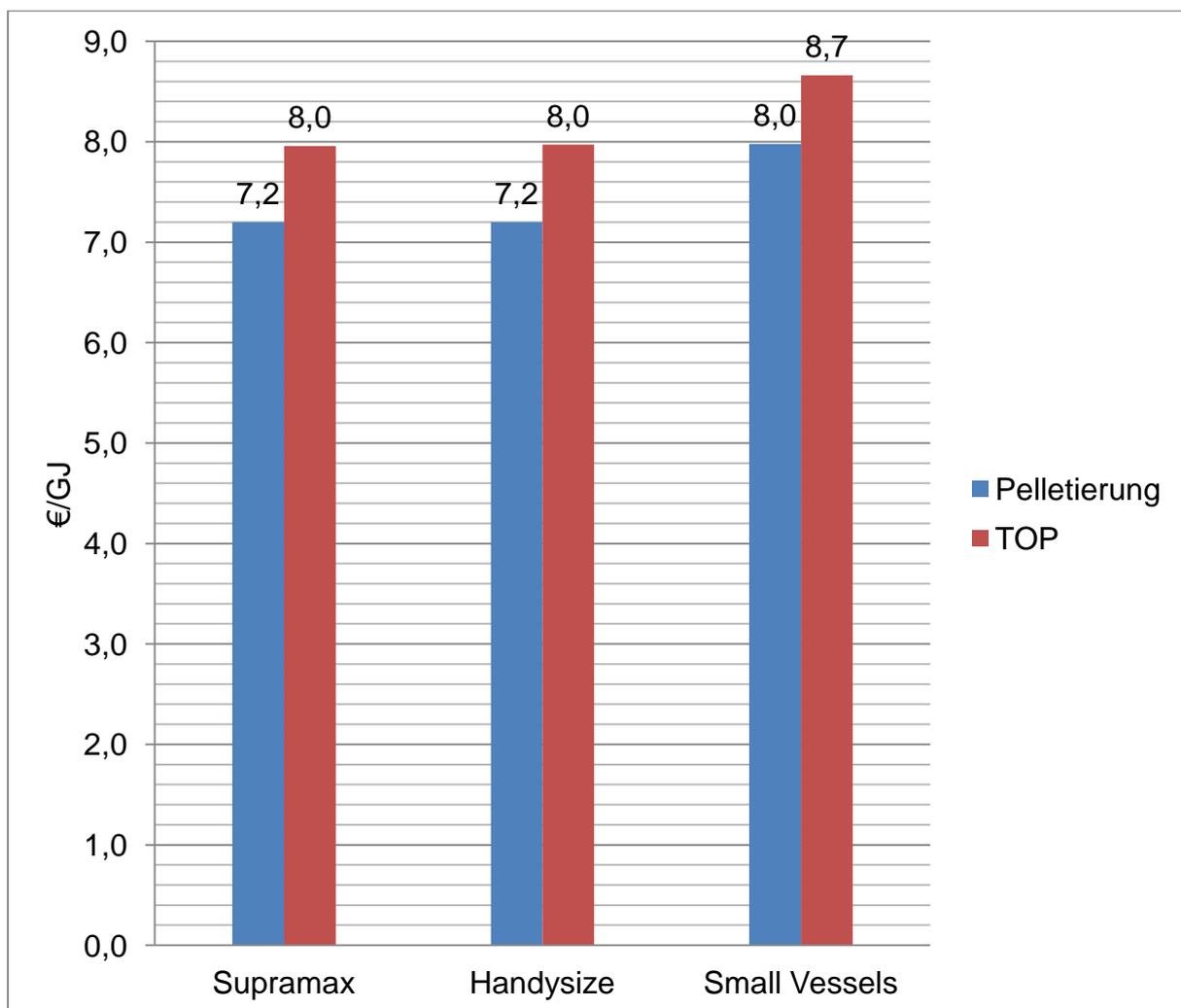
**Abb. 4.13** Kettenkostenvergleich für veränderte LKW-Preise für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

Eine Steigerung der LKW-Kosten um 50% hat eine Erhöhung von 1,6% auf Pellets und 1,6% auf TOP zur Folge. Somit zeigen steigende LKW Kosten nur geringe Veränderungen hinsichtlich der Gesamtkosten auf (ersichtlich in Tabelle 4.23 und Abb. 4.13).

### 4.2.3 Berechnung mittels unterschiedlicher Schiffstypen von Skandinavien in die Niederlande

In Kapitel 4.1.1 Berechnung mittels TOP und Pelletierung wird für Skandinavien der Schiffstyp small vessel verwendet. Aufgrund der geringen Kapazität und folglich geringerer Maße ist es diesem Typ möglich fast alle Häfen anzusteuern. Dem gegenüber steht der Nachteil der höheren Kosten. Deshalb wird untersucht, wie sich eine Änderung der Schiffstypen für den Seetransport zwischen Skandinavien und den Niederlanden auswirkt.

#### 4.2.3.1 Kostenberechnung von Biomasseversorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen



**Abb. 4.14** Kettenkostenvergleich für Biomasse für Versorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen

Durch die Verwendung der Schiffstypen Handysize und Supramax werden TOP-Pellets und Pellets aus Skandinavien günstiger als jene, welche mit small vessel transportiert werden. Dies ist auf die wesentlich größeren Kapazitäten der Schiffe zurückzuführen und in Abb. 4.14 ersichtlich.

**Tabelle 4.24** Akkumulierte Kosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Schiffstypen

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Supramax	21,3%	0,7%	6,4%	35,5%	30,1%	3,3%	2,7%
Pelletierung Handysize	21,3%	0,7%	6,4%	35,5%	30,1%	3,3%	2,7%
Pelletierung Small Vessels	19,3%	0,6%	5,8%	32,1%	27,1%	12,7%	2,5%
TOP Supramax	23,1%	0,7%	6,9%	38,5%	26,3%	2,5%	1,9%
TOP Handysize	23,1%	0,7%	6,9%	38,4%	26,3%	2,7%	1,9%
TOP Small Vessels	21,2%	0,7%	6,3%	35,3%	24,2%	10,5%	1,8%

Zwischen den Schiffstypen Handysize und Supramax gibt es hinsichtlich des Preises keine Differenz, wohingegen die Kosten für den Transport mittels small vessel um 0,8 Cent bei Pellets und um 0,7 Cent bei TOP-Pellets höher sind (ersichtlich in Tabelle 4.24 und Tabelle 4.25).

**Tabelle 4.25** Einzelkosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Schiffstypen

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Supramax	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	0,2	0,2
Pelletierung Handysize	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	0,2	0,2
Pelletierung Small Vessels	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	1,0	0,2
TOP Supramax	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,2	0,2
TOP Handysize	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,2	0,2
TOP Small Vessels	1,8	0,1	0,5	3,1	2,1	0,9	0,2

**Tabelle 4.26** Einzelkosten der Versorgungskette von Skandinavien in die Niederlande in Prozent mit unterschiedlichen Schiffstypen

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Supramax	20,7%	0,7%	6,2%	34,5%	29,2%	3,2%	2,7%
Pelletierung Handysize	20,9%	0,7%	6,3%	34,9%	29,5%	3,2%	2,7%
Pelletierung Small Vessels	19,2%	0,6%	5,7%	32,0%	27,1%	12,7%	2,5%
TOP Supramax	22,3%	0,7%	6,7%	37,2%	25,4%	2,4%	1,9%
TOP Handysize	22,6%	0,7%	6,8%	37,6%	25,7%	2,7%	1,9%
TOP Small Vessels	21,3%	0,7%	6,3%	35,4%	24,2%	10,5%	1,8%

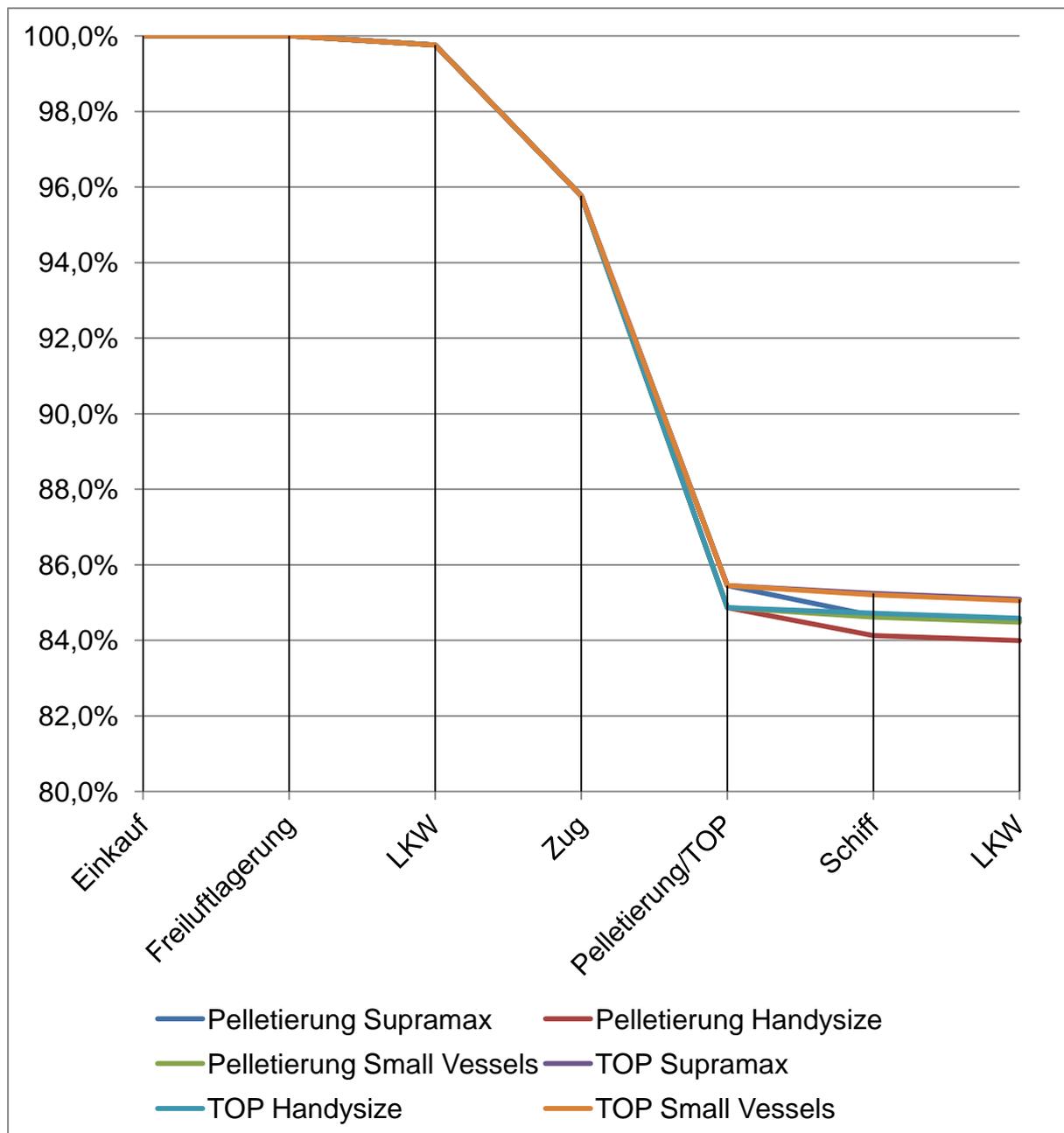
Prozentual betrachtet, besteht für Pellets, welche mit Supramax und Handysize Schiffstypen transportiert wurden kein Unterschied. Pellets welche mit small vessel transportiert wurden, weisen aber um 9,5% höhere Kosten hinsichtlich des Schiffstransports auf. TOP-Pellets welche mit dem Schiffstyp small vessel

---

transportiert werden weisen gegenüber jenen, die mit dem Typ Supramax geliefert werden, um 8,1% höhere Schiffstransportkosten auf (Tabelle 4.26). Der Grund für die höheren Schiffstransportkosten bei Pellets gegenüber TOP-Pellets, liegt in der geringeren Energiedichte. Dadurch werden für Pellets mehr Schiffe für den Transport benötigt.

#### 4.2.3.2 Energiebereitstellungseffizienz von Biomasseversorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen

Im Folgenden werden die Auswirkungen unterschiedlicher Schiffstypen für den Transport von Skandinavien in die Niederlande auf die Energiebereitstellungseffizienz analysiert.



**Abb. 4.15** Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen

**Tabelle 4.27** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten von Skandinavien in die Niederlande mit unterschiedlichen Schiffstypen

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Supramax	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	85,2%	85,1%
Pelletierung Handysize	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	85,2%	85,1%
Pelletierung Small Vessels	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	84,7%	84,5%
TOP Supramax	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	84,7%	84,6%
TOP Handysize	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	84,6%	84,5%
TOP Small Vessels	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	84,9%	84,1%	84,0%

Die beiden größeren Schiffstypen Supramax und Handysize weisen eine bessere Energiebereitstellungseffizienz als der Schiffstyp small vessel auf (Abb. 4.15 und Tabelle 4.27). Allerdings sind die Differenzen wesentlich geringer als jene, die bei der Kostenberechnung in 4.2.3.1 ermittelt wurden.

### 4.3 Berechnung mit unterschiedlichen Biomassearten

In diesem Fall wird untersucht, welche Auswirkungen unterschiedliche Biomassearten auf die Kosten haben. In Tabelle 4.28 werden die verwendeten Biomassearten und deren Eigenschaften sowie Kosten aufgelistet. Die Berechnung für composite residue logs wurde bereits in Kapitel 4.1.1 durchgeführt.

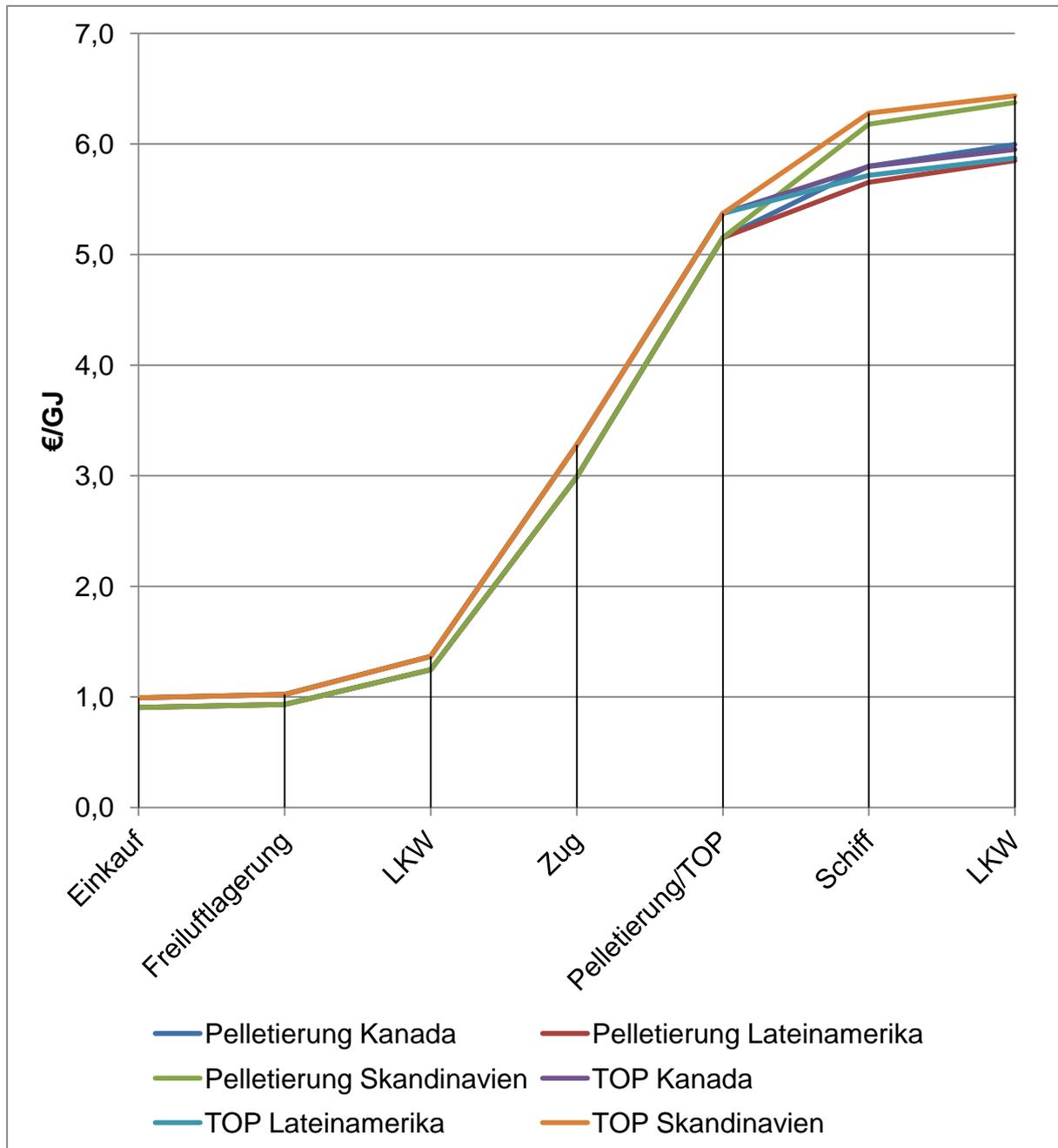
**Tabelle 4.28** Verwendete Biomassearten

	Holzstämme	Bündel	composite residue logs
€/t	9,3	48,5	17,4
€/GJ	0,9	3,9	1,5
Dichte kg/m <sup>3</sup>	462	160	251
Feuchtigkeit %	50	37	45

Holzstämme haben von den drei verwendeten Biomassearten die größte Dichte und sind am kostengünstigsten. Somit sollte das Ergebnis der Berechnung der Biomasseversorgungskette mit Holzstämmen kostengünstiger sein und eine höhere Energiebereitstellungseffizienz aufweisen, als jene mit Bündel oder composite residue logs.

### 4.3.1 Kostenberechnung mit Holzstämmen

Im ersten Schritt werden die Kosten für die Biomasseversorgungskette mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial berechnet. Gegenüber den in Kapitel 4.1.1 definierten Biomasseversorgungsketten wird nur das Ausgangsmaterial verändert.



**Abb. 4.16** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Holzstämmen.

Pellets mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial, weisen Kosten zwischen 5,9€/GJ und 6,4€/GJ auf. Interessanterweise liegen die Kosten für TOP-Pellets ebenfalls zwischen 5,9€/GJ und 6,4€/GJ (Abb. 4.16 und Tabelle 4.29).

**Tabelle 4.29** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	5,8	6,0
Pelletierung Lateinamerika	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	5,7	5,9
Pelletierung Skandinavien	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	6,2	6,4
TOP Kanada	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	5,8	6,0
TOP Lateinamerika	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	5,7	5,9
TOP Skandinavien	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	6,3	6,4

Die in Tabelle 4.30 und Tabelle 4.31 aufgelisteten Einzelkosten der Versorgungsketten, sind für die Pelletierung und TOP am höchsten, da Holzstämmen eine hohe Energiedichte und geringe Kosten aufweisen. Somit ist der Transport vor der Verarbeitung wesentlich günstiger, da weniger Transportmittel benötigt werden.

**Tabelle 4.30** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial.

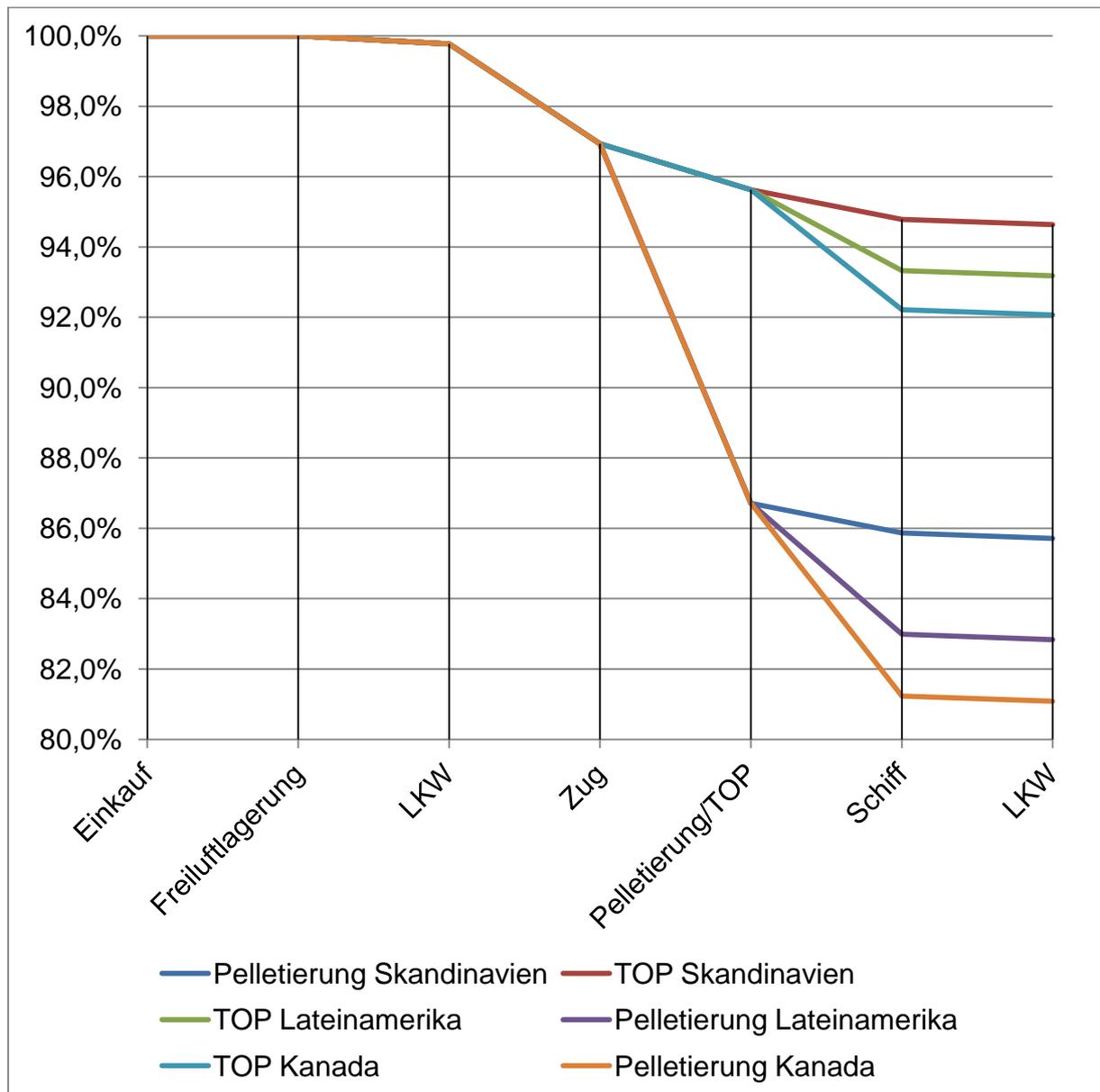
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	0,9	0,0	0,3	1,7	2,2	0,6	0,2
Pelletierung Lateinamerika	0,9	0,0	0,3	1,7	2,2	0,5	0,2
Pelletierung Skandinavien	0,9	0,0	0,3	1,7	2,2	1,0	0,2
TOP Kanada	1,0	0,0	0,3	1,9	2,1	0,4	0,2
TOP Lateinamerika	1,0	0,0	0,3	1,9	2,1	0,3	0,2
TOP Skandinavien	1,0	0,0	0,3	1,9	2,1	0,9	0,2

**Tabelle 4.31** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	12,2%	0,4%	4,2%	23,5%	29,2%	8,7%	2,7%
Pelletierung Lateinamerika	12,3%	0,4%	4,3%	23,8%	29,5%	6,8%	2,7%
Pelletierung Skandinavien	11,3%	0,4%	3,9%	21,8%	27,1%	12,8%	2,5%
TOP Kanada	12,0%	0,4%	4,2%	23,3%	25,4%	5,1%	1,9%
TOP Lateinamerika	12,2%	0,4%	4,2%	23,5%	25,7%	4,2%	1,9%
TOP Skandinavien	11,5%	0,4%	4,0%	22,1%	24,2%	10,5%	1,8%

### 4.3.2 Energiebereitstellungseffizienz von Biomasseversorgungsketten mit Holzstämmen

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial auf die Energiebereitstellungseffizienz der Biomasseversorgungsketten analysiert.



**Abb. 4.17** Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit Holzstämmen

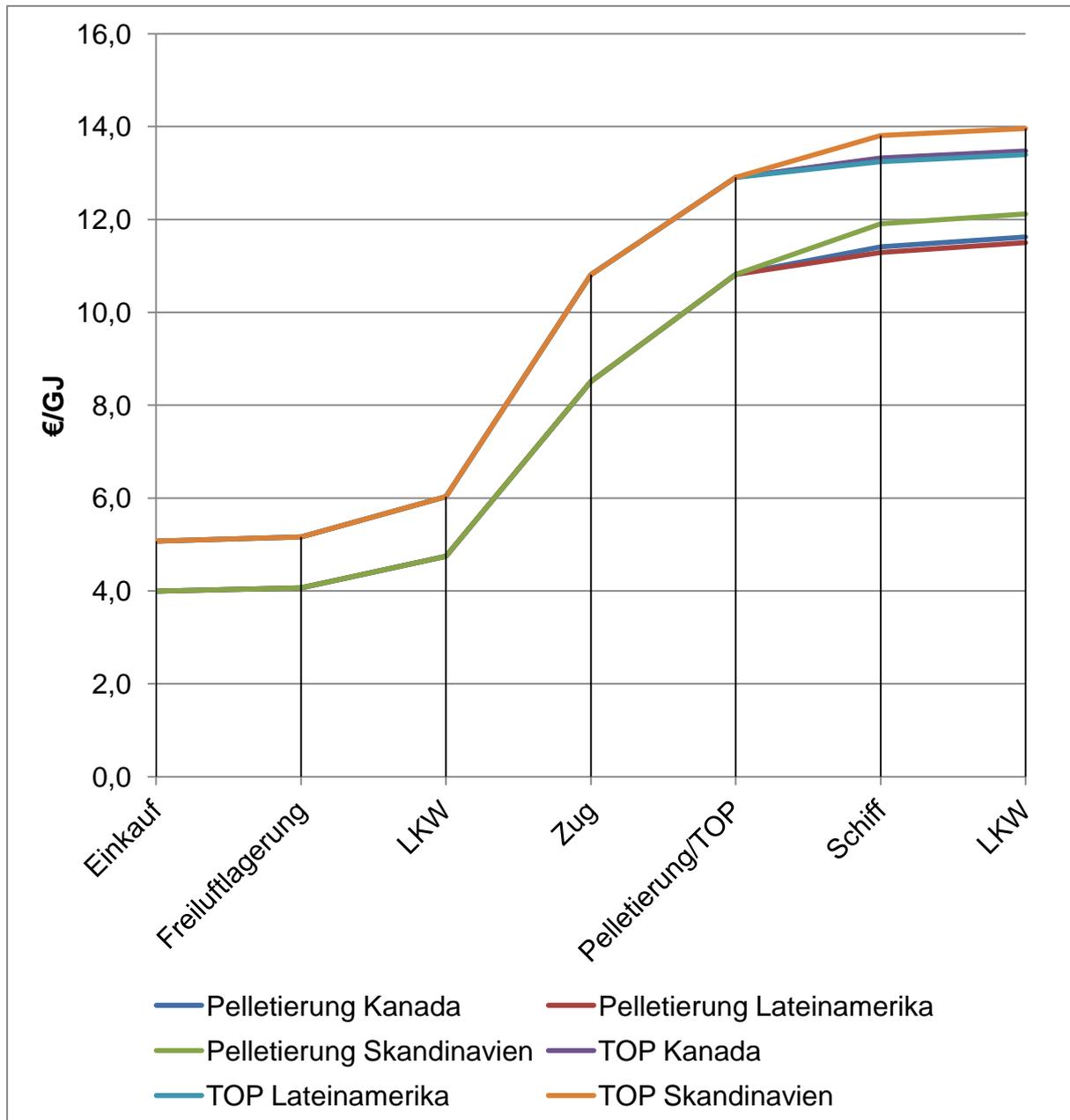
Aufgrund der hohen Energiedichte von Holzstämmen liegt die Energiebereitstellungseffizienz von Pellets zwischen 81,1% und 85,7% und jene von TOP-Pellets zwischen 92,1% und 94,6% (Abb. 4.17 und Tabelle 4.32).

**Tabelle 4.32** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	86,7%	81,2%	81,1%
Pelletierung Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	86,7%	83,0%	82,8%
Pelletierung Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	86,7%	85,9%	85,7%
TOP Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	95,6%	92,2%	92,1%
TOP Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	95,6%	93,3%	93,2%
TOP Skandinavien	100,0%	100,0%	99,8%	96,9%	95,6%	94,8%	94,6%

### 4.3.3 Kostenberechnung mit Bündel

Im zweiten Schritt werden die Kosten für die Biomasseversorgungskette mit Bündel als Ausgangsmaterial berechnet. Gegenüber den in Kapitel 4.1.1 definierten Biomasseversorgungsketten wird nur das Ausgangsmaterial verändert.



**Abb. 4.18** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Bündel

Pellets mit Bündel als Ausgangsmaterial weisen Kosten zwischen 11,5€/GJ und 12,1€/GJ auf, wohingegen die Kosten für TOP-Pellets zwischen 13,4€/GJ und 13,5€/GJ liegen (Abb. 4.18 und Tabelle 4.33).

**Tabelle 4.33** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Bündel als Ausgangsmaterial.

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,4	11,6
Pelletierung Lateinamerika	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,3	11,5
Pelletierung Skandinavien	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,9	12,1
TOP Kanada	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,3	13,5
TOP Lateinamerika	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,2	13,4
TOP Skandinavien	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,8	14,0

Die in Tabelle 4.34 und Tabelle 4.35 aufgelisteten Einzelkosten der Versorgungsketten sind für den Zugtransport und den Einkauf am höchsten, da Bündel eine geringere Energiedichte und höhere Kosten aufweisen. Somit ist der Transport vor der Verarbeitung wesentlich teurer, da mehr Transportmittel benötigt werden.

**Tabelle 4.34** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Bündel als Ausgangsmaterial.

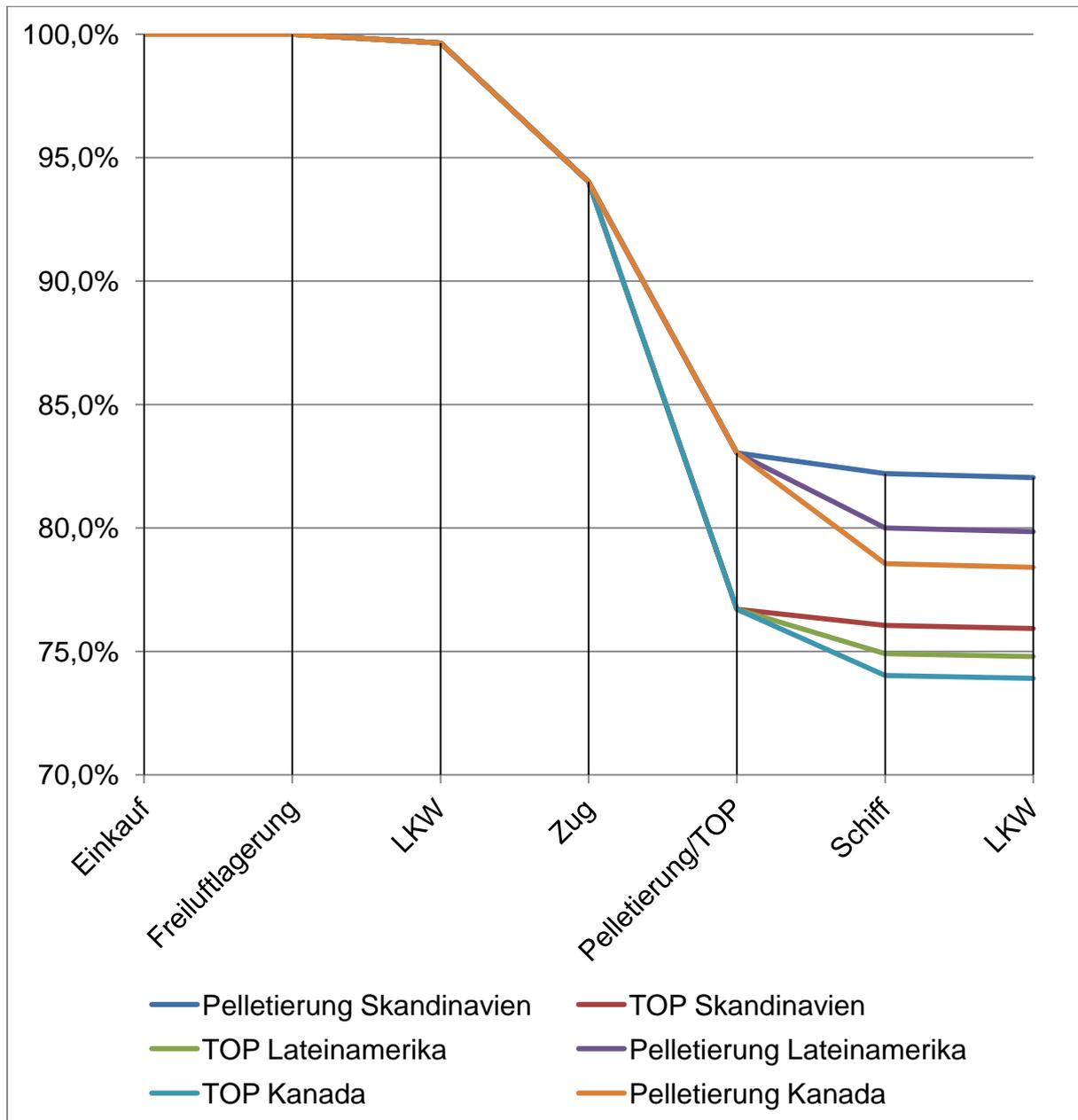
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	4,0	0,1	0,7	3,8	2,3	0,6	0,2
Pelletierung Lateinamerika	4,0	0,1	0,7	3,8	2,3	0,5	0,2
Pelletierung Skandinavien	4,0	0,1	0,7	3,8	2,3	1,1	0,2
TOP Kanada	5,1	0,1	0,9	4,8	2,1	0,4	0,2
TOP Lateinamerika	5,1	0,1	0,9	4,8	2,1	0,3	0,2
TOP Skandinavien	5,1	0,1	0,9	4,8	2,1	0,9	0,2

**Tabelle 4.35** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit Bündel als Ausgangsmaterial

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	34,3%	0,6%	5,8%	32,4%	19,9%	5,1%	1,8%
Pelletierung Lateinamerika	34,7%	0,6%	5,9%	32,8%	20,1%	4,1%	1,8%
Pelletierung Skandinavien	32,9%	0,6%	5,6%	31,1%	19,1%	9,0%	1,7%
TOP Kanada	37,6%	0,7%	6,4%	35,5%	15,5%	3,1%	1,1%
TOP Lateinamerika	37,9%	0,7%	6,4%	35,7%	15,6%	2,5%	1,2%
TOP Skandinavien	36,3%	0,7%	6,2%	34,3%	15,0%	6,5%	1,1%

#### 4.3.4 Energiebereitstellungseffizienz von Biomasseversorgungsketten mit Bündel

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Verwendung von Bündel als Ausgangsmaterial auf die Energiebereitstellungseffizienz der Biomasseversorgungsketten analysiert.



**Abb. 4.19** Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit Bündel

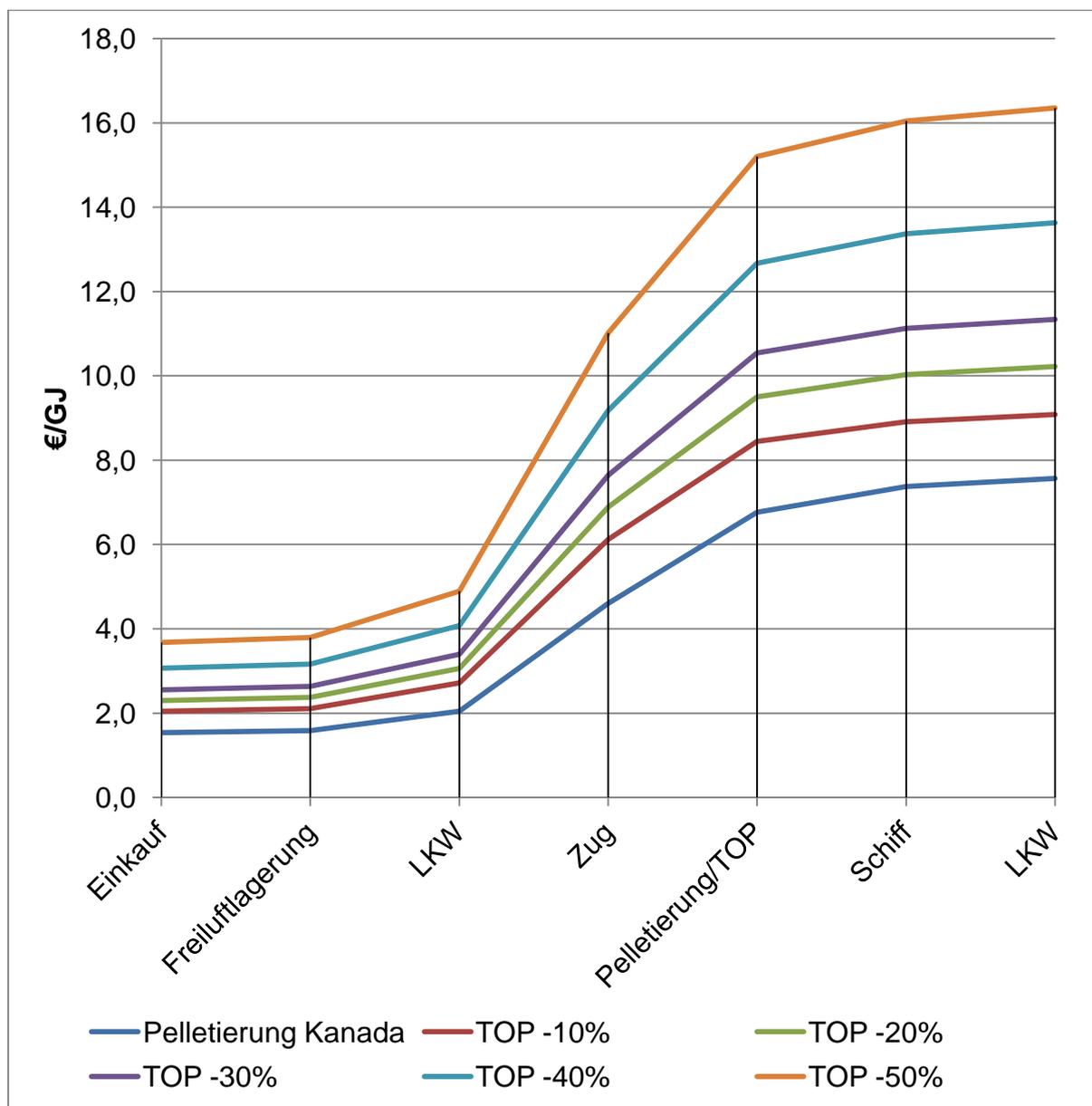
Aufgrund der geringeren Energiedichte von Bündel, liegt die Energiebereitstellungseffizienz von Pellets zwischen 78,4% und 82,0% und jene von TOP-Pellets zwischen 73,9% und 75,9% (Abb. 4.19 und Tabelle 4.36).

**Tabelle 4.36** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit Bündel als Ausgangsmaterial

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	83,0%	78,6%	78,4%
Pelletierung Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	83,0%	80,0%	79,9%
Pelletierung Skandinavien	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	83,0%	82,2%	82,0%
TOP Kanada	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	76,7%	74,0%	73,9%
TOP Lateinamerika	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	76,7%	74,9%	74,8%
TOP Skandinavien	100,0%	100,0%	99,6%	94,0%	76,7%	76,1%	75,9%

#### 4.4 Veränderte Energiedichte von TOP-Pellets

Die Energiedichte von TOP-Pellets kann je nach Produktionsverfahren variieren. Deshalb ist es sinnvoll die Auswirkung einer Veränderung dieses Parameters zu untersuchen. Dies wird hier für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande mit composite residues logs als Ausgangsmaterial durchgeführt.



**Abb. 4.20** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit veränderter Energiedichte für TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

Sinkt die Energiedichte von TOP-Pellets auf -50%, so liegen die Kosten für diese bei 16,4€/GJ. Im Vergleich hierzu liegen die Kosten für Pellets bei 7,6€/GJ (Abb. 4.20 und Tabelle 4.37).

**Tabelle 4.37** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit veränderter Energiedichte für TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

	Einkauf	Lagerung	LKW	Pelletierung/ TOP	Zug	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,4	7,6
TOP -10%	2,0	2,1	2,7	6,1	8,4	8,9	9,1
TOP -20%	2,3	2,4	3,1	6,9	9,5	10,0	10,2
TOP -30%	2,6	2,6	3,4	7,6	10,5	11,1	11,3
TOP -40%	3,1	3,2	4,1	9,2	12,7	13,4	13,6
TOP -50%	3,7	3,8	4,9	11,0	15,2	16,0	16,4

Eine Verringerung der Energiedichte von TOP-Pellets beeinflusst die Kosten (€/GJ des Endprodukts) für den Einkauf, den Zugtransport und für den TOP-Prozess am stärksten (Tabelle 4.38 und Tabelle 4.39).

**Tabelle 4.38** Einzelkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Energiedichten der TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

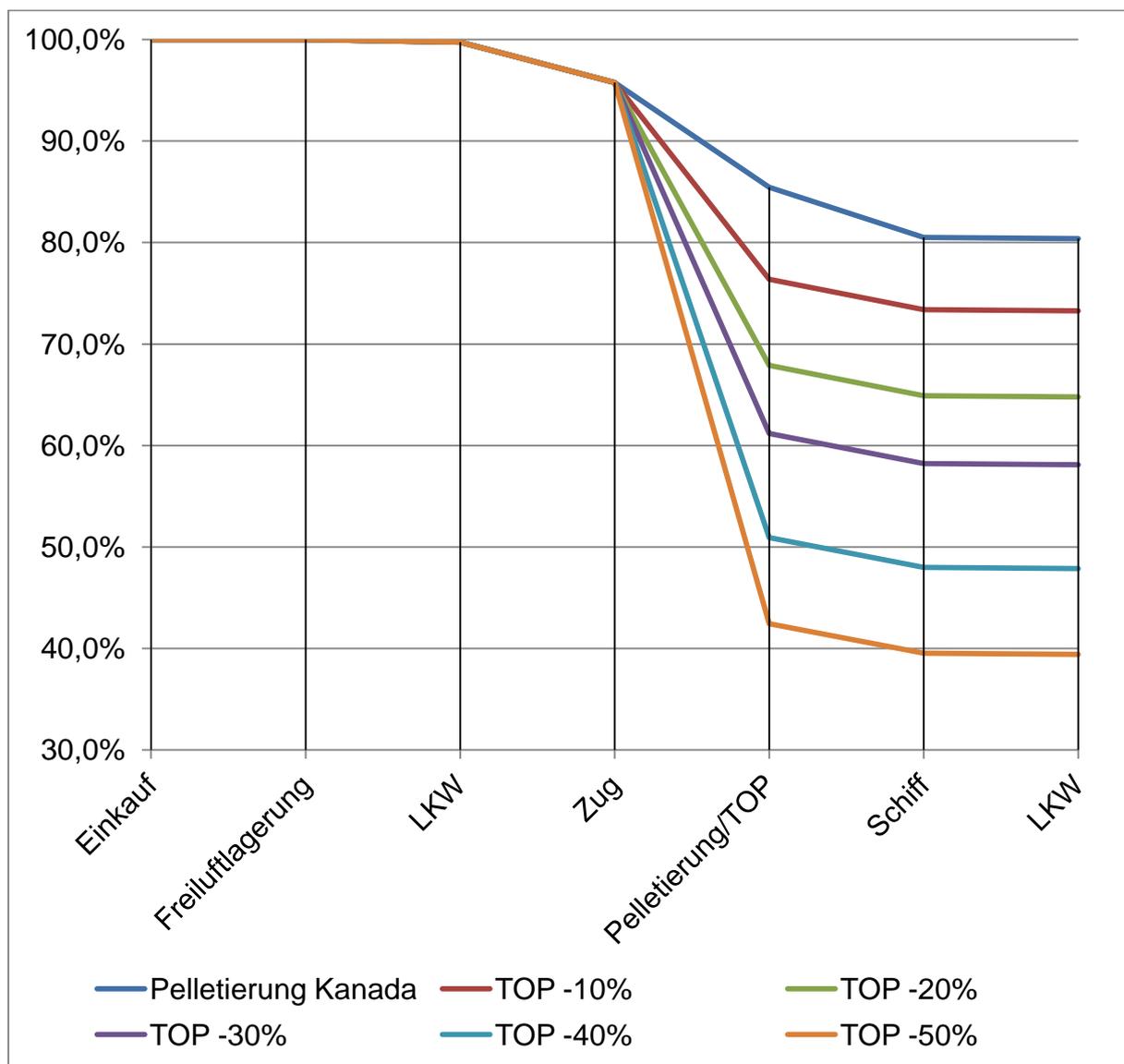
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	1,5	0,0	0,5	2,6	2,2	0,6	0,2
TOP -20%	2,3	0,1	0,7	3,8	2,6	0,5	0,2
TOP -40%	3,1	0,1	0,9	5,1	3,5	0,7	0,3
TOP -10%	2,0	0,1	0,6	3,4	2,3	0,5	0,2
TOP -30%	2,6	0,1	0,8	4,2	2,9	0,6	0,2
TOP -50%	3,7	0,1	1,1	6,1	4,2	0,8	0,3

**Tabelle 4.39** Einzelkosten der Versorgungsketten in Prozent mit veränderter Energiedichte torrefizierter Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	20,3%	0,6%	6,1%	33,8%	28,6%	8,0%	2,6%
TOP -10%	33,7%	1,1%	10,1%	56,2%	38,4%	7,7%	2,8%
TOP -20%	22,5%	0,7%	6,7%	37,4%	25,6%	5,2%	1,9%
TOP -30%	18,0%	0,6%	5,4%	30,0%	20,5%	4,1%	1,5%
TOP -40%	18,7%	0,6%	5,6%	31,2%	21,3%	4,3%	1,6%
TOP -50%	22,5%	0,7%	6,7%	37,4%	25,6%	5,2%	1,9%

#### 4.4.1 Energiebereitstellungseffizienz von TOP-Pellets mit unterschiedlicher Energiedichte

Im Folgenden werden die Auswirkungen der veränderten Energiedichte von TOP-Pellets auf die Energiebereitstellungseffizienz der Biomasseversorgungsketten analysiert.



**Abb. 4.21** Energiebereitstellungseffizienz bei Versorgungsketten mit veränderter Energiedichte torrefizierter Pellets

Bei einer Verringerung der Energiedichte von TOP-Pellets, liegt die Energiebereitstellungseffizienz von diesen nur mehr zwischen 39,4% und 73,3% (Abb. 4.21 und Tabelle 4.40).

**Tabelle 4.40** Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts von Biomasseversorgungsketten mit unterschiedlichen Energiedichten der TOP-Pellets für die Biomasseversorgungskette von Kanada in die Niederlande

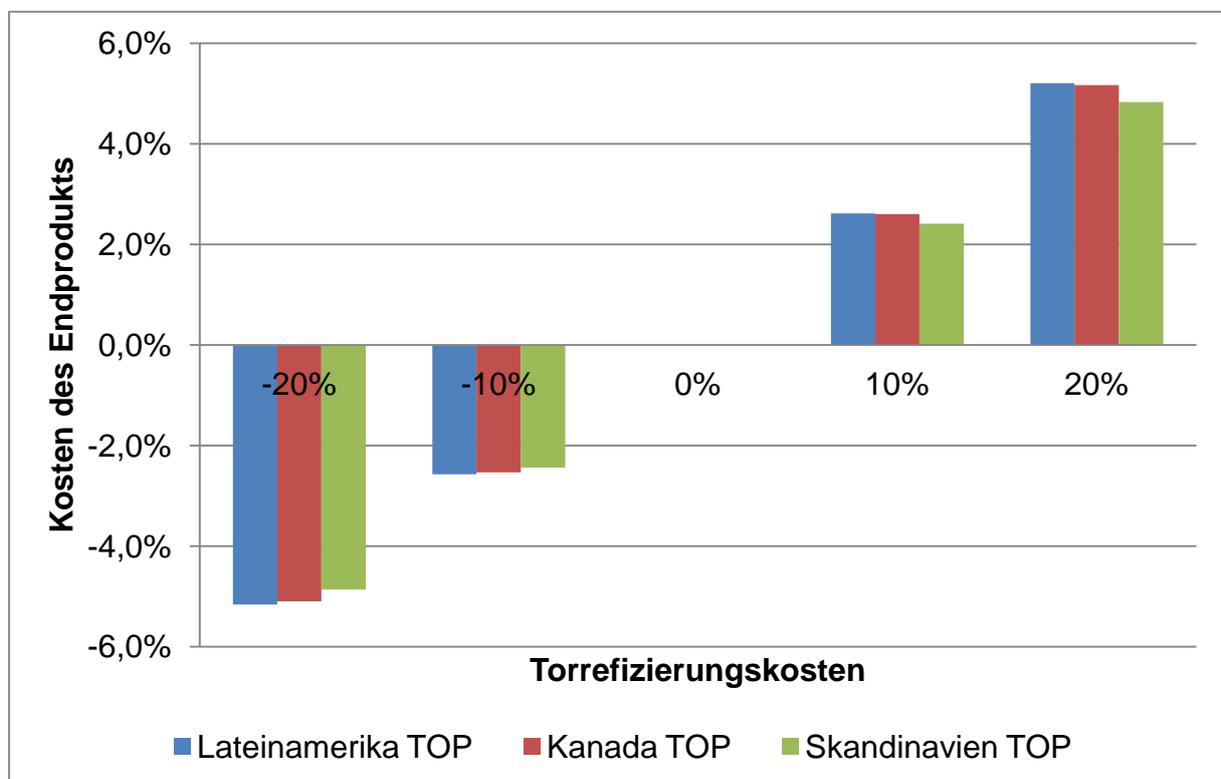
	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Pelletierung Kanada	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	85,5%	80,5%	80,4%
TOP -10%	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	76,4%	73,4%	73,3%
TOP -20%	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	67,9%	64,9%	64,8%
TOP -30%	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	61,2%	58,2%	58,1%
TOP -40%	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	50,9%	48,0%	47,9%
TOP -50%	100,0%	100,0%	99,8%	95,8%	42,4%	39,5%	39,4%

## 4.5 Berechnung mittels veränderter TOP Prozesskosten

Im Folgenden werden die Kosten des TOP-Prozess um 10% und 20% erhöht sowie gesenkt, um eine Änderung der Produktionskosten zu simulieren. Dies ist vor allem für den TOP-Prozess notwendig, da dieser noch nicht kommerziell genutzt wird und somit nur Kostenabschätzungen gemacht werden können. Für die Berechnung werden die Biomasseversorgungsketten aus Kapitel 4.1.1 herangezogen.

### 4.5.1 Prozesskostenänderung TOP

Erhöht bzw. senkt man die TOP-Prozesskosten, so erhält man eine fast lineare Auswirkung auf die Kosten des Endprodukts (Abb. 4.22).



**Abb. 4.22** grafische Darstellung der prozentualen Änderung der TOP-Prozesskosten und deren Auswirkungen auf die Kosten des Endprodukts.

Wie in Tabelle 4.41 ersichtlich, hat eine Erhöhung der TOP-Kosten um zwanzig Prozent einen erhöhten Endproduktpreis zwischen 4,8 und 5,2 Prozent zur Folge. Die geringsten Auswirkungen auf die Gesamtproduktionskosten findet man in der Biomasseversorgungskette von Skandinavien in die Niederlande.

**Tabelle 4.41** Prozentuale Änderung der TOP-Prozesskosten und deren Auswirkung auf die Gesamtkosten des Endprodukts.

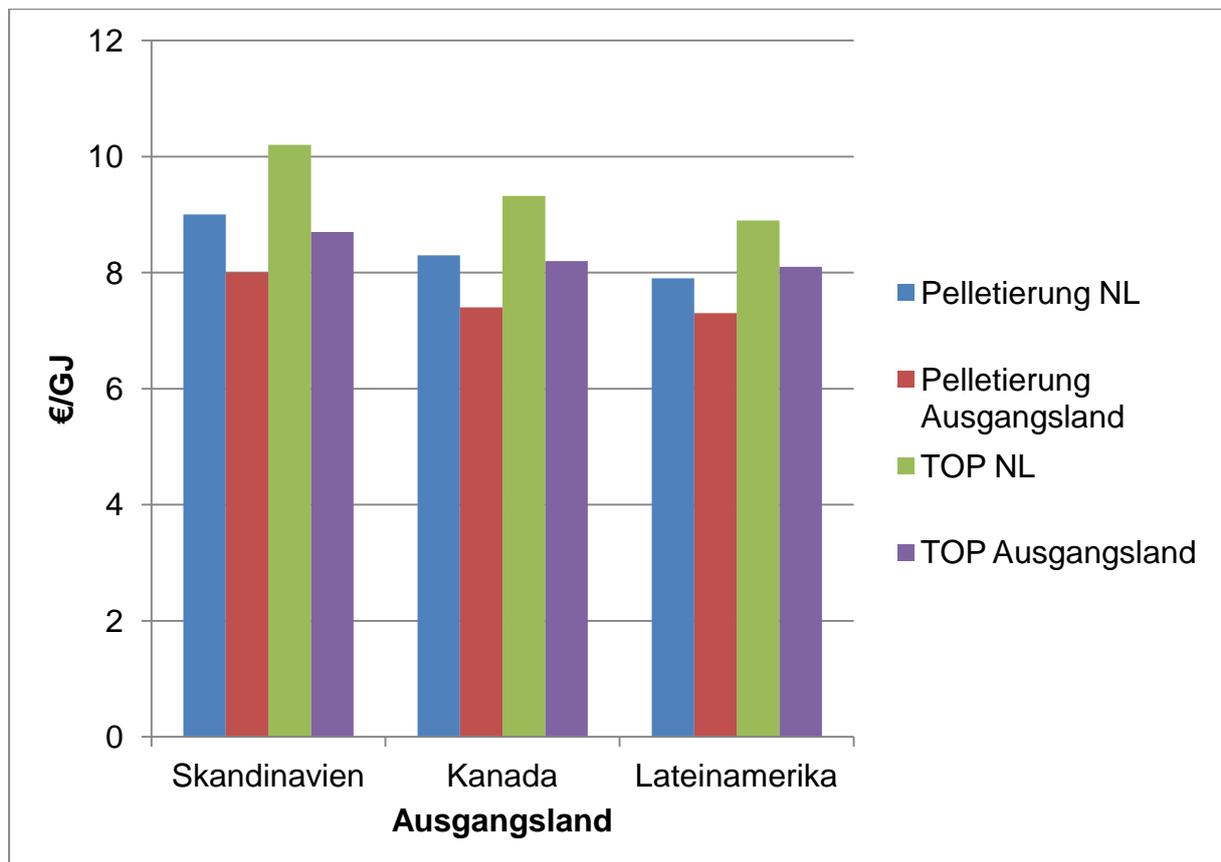
	Ursprungsland Lateinamerika		Ursprungsland Kanada		Ursprungsland Skandinavien	
	€/GJ	Prozentuale Änderung	€/GJ	Prozentuale Änderung	€/GJ	Prozentuale Änderung
TOP+20%	8,5	5,2%	8,6	5,2%	9,1	4,8%
TOP+10%	8,3	2,6%	8,4	2,6%	8,9	2,4%
TOP	8,1	0,0%	8,2	0,0%	8,7	0,0%
TOP-10%	7,9	-2,6%	8,0	-2,5%	8,5	-2,4%
TOP-20%	7,7	-5,2%	7,8	-5,1%	8,2	-4,9%

## 4.6 Vergleich der Berechnungen

In diesem Kapitel werden die vorhergehenden Berechnungen der Kapitel 4.1 bis Kapitel 4.5 miteinander verglichen, um eine Sensitivitätsanalyse durchführen zu können.

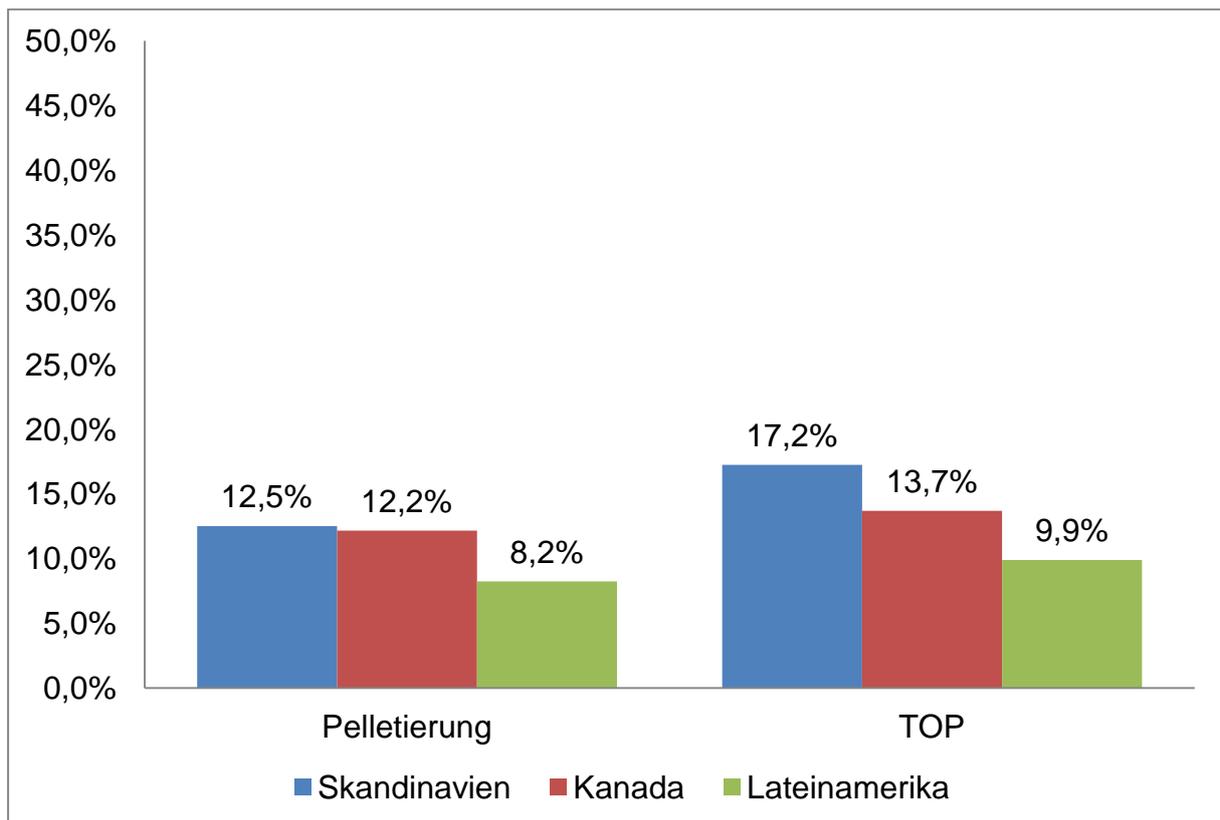
### 4.6.1 Kostenvergleich zwischen Verarbeitung im Ausgangsland und Verarbeitung im Zielland

In Kapitel 4.1.1 Berechnung mittels TOP und Pelletierung wurden der TOP-Prozess bzw. Pelletierung im Ausgangsland berechnet. Diese Ergebnisse werden nun mit jenen aus Kapitel 4.1.3 Berechnung mittels TOP und Pelletierung in den Niederlanden verglichen.



**Abb. 4.23** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit Verarbeitung im Ausgangsland und Verarbeitung im Zielland

Der direkte Vergleich in Abb. 4.23 zwischen der Verarbeitung im Zielland bzw. der Verarbeitung im Ausgangsland, zeigt den extremen Kostenunterschied, welche eine zu späte Transformierung des Ausgangsmaterials in das Endprodukt bewirken kann.



**Abb. 4.24** Darstellung der Mehrkosten für Pelletierung bzw. TOP von Versorgungsketten mit Verarbeitung im Zielland gegenüber der Verarbeitung im Ausgangsland in Prozent

Wie in Abb. 4.24 ersichtlich, ist eine Verarbeitung im Zielland mit sehr viel höheren Kosten verbunden. Besonders bei TOP liegen diese um 17,2% aus Skandinavien und um 13,7% aus Kanada höher, als jene, bei denen das Endprodukt bereits im Ursprungsland hergestellt wurde.

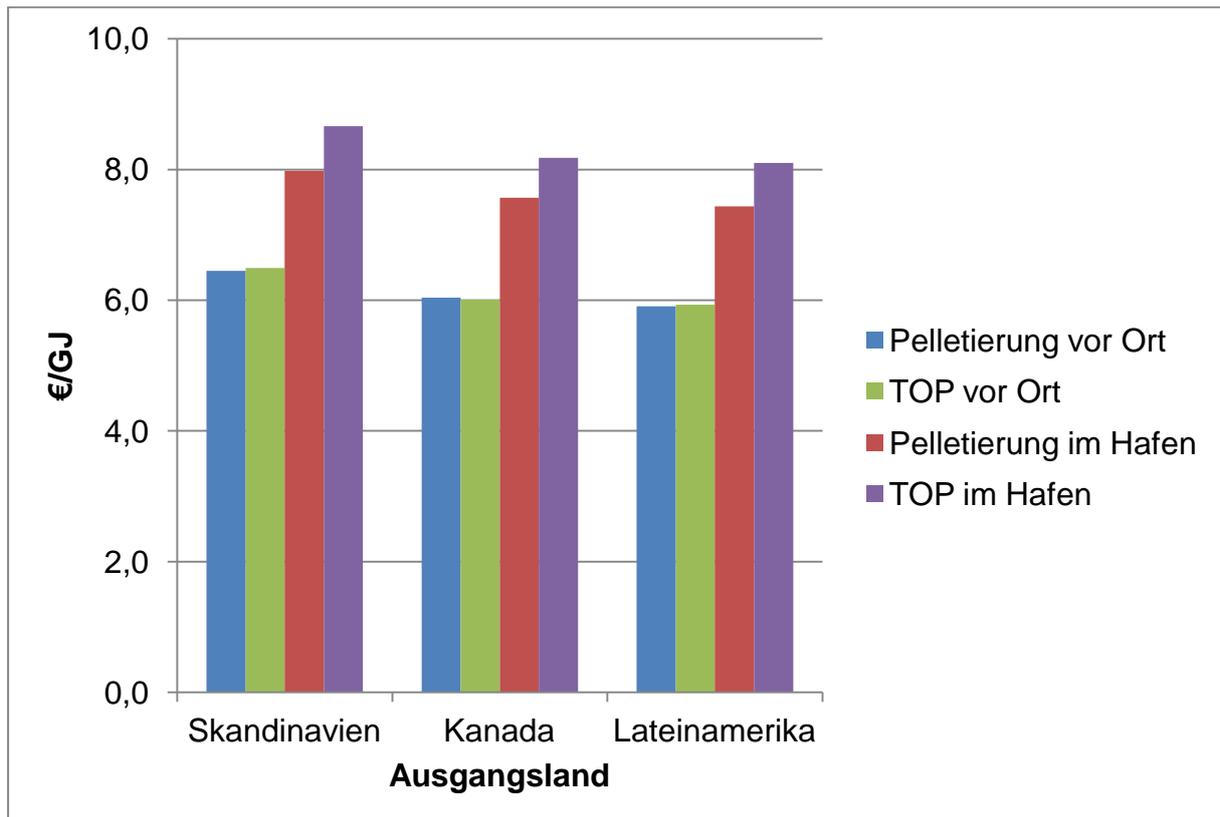
In Tabelle 4.42 findet man die akkumulierten Kosten der Versorgungsketten in €/GJ für den jeweiligen Versorgungskettenschritt.

**Tabelle 4.42** Akkumulierte Kosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit Verarbeitung in den Niederlanden und in den Ursprungsländern

Verarbeitung in NL	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Schiff	Pelletierung/ TOP	LKW
Skandinavien - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	8	10,1	10,2
Kanada -TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	7,1	9,2	9,3
Lateinamerika - TOP NL	1,8	1,9	2,4	5,5	6,7	8,8	8,9
Skandinavien - Pelletierung NL	1,5	1,6	2	4,6	6,7	8,8	9
Kanada - Pelletierung NL	1,5	1,6	2	4,6	5,9	8,1	8,3
Lateinamerika - Pelletierung NL	1,5	1,6	2	4,6	5,6	7,7	7,9
Verarbeitung im Ursprungsland	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
TOP Skandinavien	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,5	8,7
TOP Kanada	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,1	8,2
TOP Lateinamerika	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8	8,1
Pelletierung Skandinavien	1,5	1,6	2	4,6	6,8	7,8	8
Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2	4,6	6,8	7,2	7,4
Pelletierung Lateinamerika	1,5	1,6	2	4,6	6,8	7,1	7,3

#### 4.6.2 Kostenvergleich zwischen Produktion des Endprodukts im Holzschlägerungsgebiet und im Hafen

In Kapitel 4.1.1 Berechnung mittels TOP und Pelletierung wurden der TOP-Prozess bzw. Pelletierung im Ausgangsland berechnet. Diese Ergebnisse werden nun mit jenen aus Kapitel 4.1.2 Berechnung mittels TOP und Pelletierung im Holzschlägerungsgebiet verglichen.

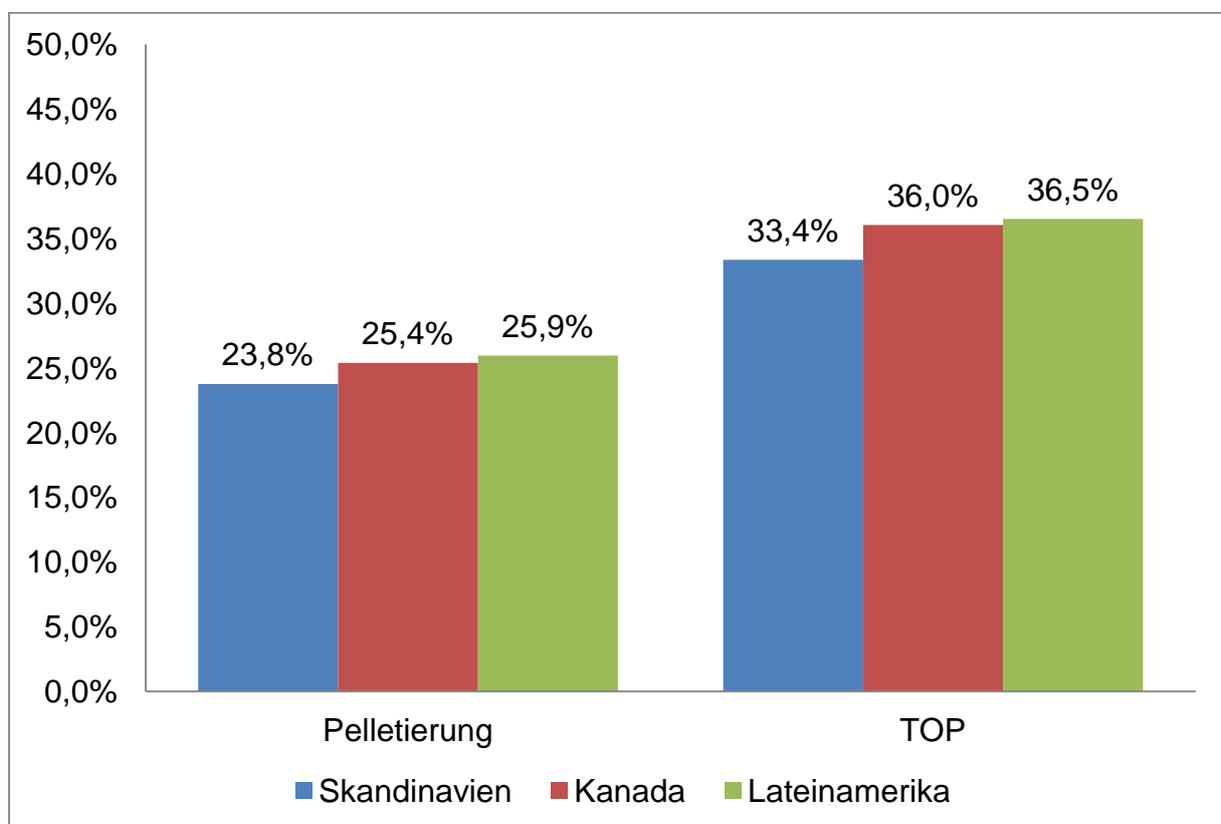


**Abb. 4.25** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Endproduktherstellungsorten

Wie in Abb. 4.25, Tabelle 4.43 und Abb. 4.26 ersichtlich, führt auch eine Verlagerung des Produktionsstandortes vom Hafen in das Holzsschlagerungsgebiet zu einer Kostensenkung. Diese kann zwischen 23,8% und 36,5% betragen. Am kostengünstigsten sind TOP-Pellets und Pellets aus Lateinamerika mit Endkosten von 5,9€/GJ, wohingegen TOP Pellets aus Skandinavien mit 8,7€/GJ am teuersten sind.

**Tabelle 4.43** Endkosten der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts für die Verarbeitung im Hafen und im Holzschlängerungsgebiet

	Verarbeitung im Hafen	Verarbeitung im Holzschlängerungsgebiet
Pelletierung Skandinavien	8,0	6,4
Pelletierung Kanada	7,6	6,0
Pelletierung Lateinamerika	7,4	5,9
TOP Skandinavien	8,7	6,5
TOP Kanada	8,2	6,0
TOP Lateinamerika	8,1	5,9

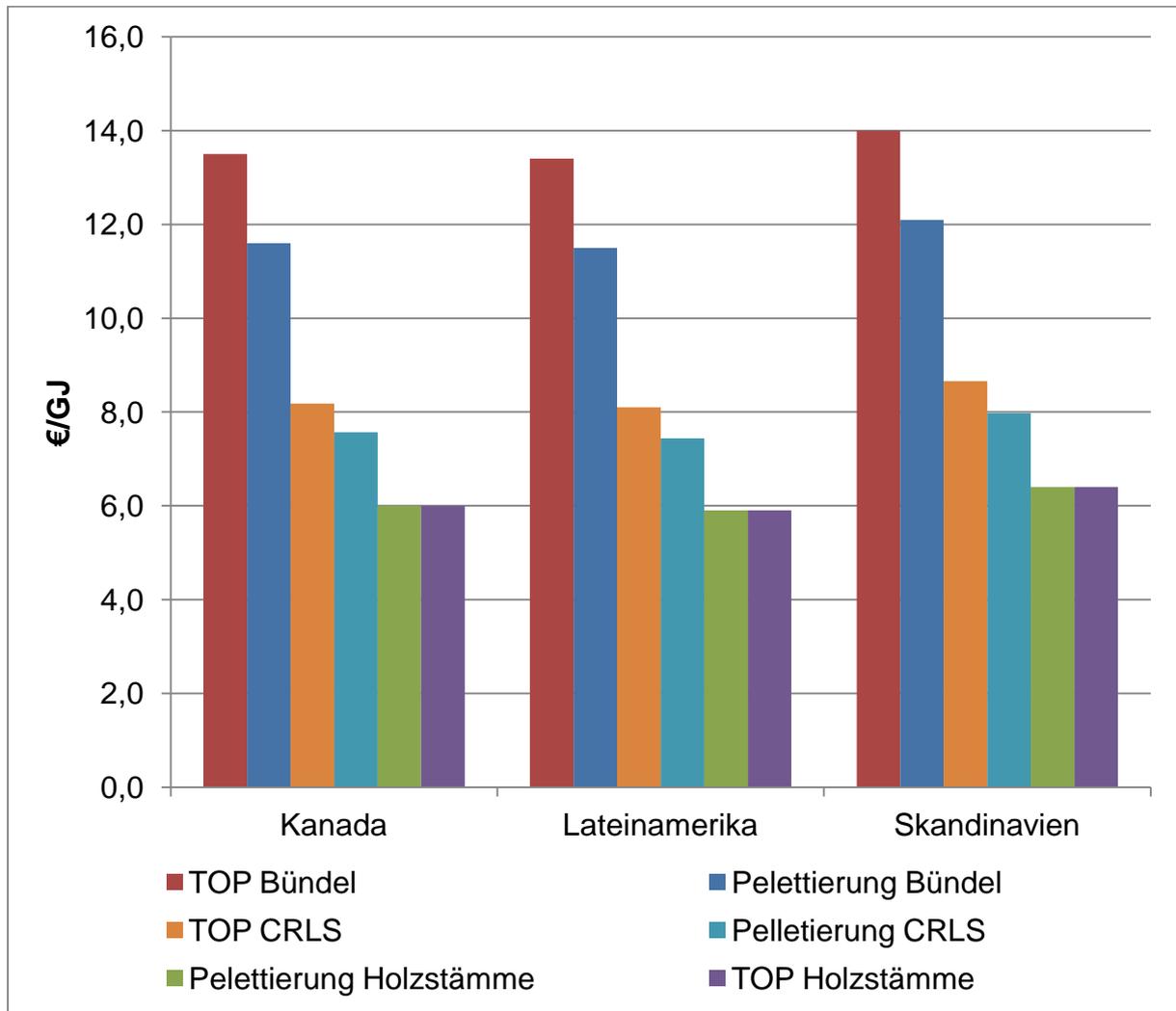


**Abb. 4.26** Kostenänderung bei Verarbeitung im Hafen gegenüber der Verarbeitung im Holzschlängerungsgebiet

Eine Verarbeitung zu Pellets bzw. TOP-Pellets im Produktionsgebiet hat eine nicht zu unterschätzende Auswirkung auf die Kosten. Je früher in der Versorgungskette das Rohmaterial zum Endprodukt verarbeitet wird, desto größer ist die Kostenersparnis. Diese beträgt im untersuchten Fall zwischen 23,8% und 25,9% für Pellets und zwischen 33,4% und 36,5% für TOP-Pellets.

### 4.6.3 Vergleich unterschiedlicher Biomassearten

Die Ergebnisse unterschiedlicher Biomassearten als Ausgangsmaterial werden nun miteinander verglichen und sind in Abb. 4.27 abgebildet.



**Abb. 4.27** Kostenvergleich von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien

Wie aus Abb. 4.27 und Tabelle 4.44 ersichtlich, sind TOP-Pellets, welche aus Bündel aus Skandinavien hergestellt werden mit 14,0€/GJ wesentlich teurer, als TOP-Pellets mit 8,7€/GJ, welche aus composite residue logs hergestellt und aus Skandinavien importiert werden. Am kostengünstigsten sind TOP-Pellets und Pellets aus Lateinamerika, für welche Holzstämme als Ausgangsmaterial verwendet wird mit 5,9€/GJ.

**Tabelle 4.44** Kostenvergleich der Versorgungsketten in €/GJ des Endprodukts mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien.

Ausgangs- material	akkumulierte Kosten	Einkauf	Lagerung	LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Holzstämmen	Pelletierung Lateinamerika	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	5,7	5,9
Holzstämmen	TOP Lateinamerika	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	5,7	5,9
Holzstämmen	Pelletierung Kanada	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	5,8	6,0
Holzstämmen	TOP Kanada	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	5,8	6,0
Holzstämmen	Pelletierung Skandinavien	0,9	0,9	1,2	3,0	5,2	6,2	6,4
Holzstämmen	TOP Skandinavien	1,0	1,0	1,4	3,3	5,4	6,3	6,4
composite residue logs	Pelletierung Lateinamerika	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,2	7,4
composite residue logs	Pelletierung Kanada	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,4	7,6
composite residue logs	Pelletierung Skandinavien	1,5	1,6	2,0	4,6	6,8	7,8	8,0
composite residue logs	TOP Lateinamerika	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	7,9	8,1
composite residue logs	TOP Kanada	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,0	8,2
composite residue logs	TOP Skandinavien	1,8	1,9	2,4	5,5	7,6	8,5	8,7
Bündel	Pelletierung Lateinamerika	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,3	11,5
Bündel	Pelletierung Kanada	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,4	11,6
Bündel	Pelletierung Skandinavien	4,0	4,1	4,7	8,5	10,8	11,9	12,1
Bündel	TOP Lateinamerika	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,2	13,4
Bündel	TOP Kanada	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,3	13,5
Bündel	TOP Skandinavien	5,1	5,2	6,0	10,8	12,9	13,8	14,0

Die Wahl des Ausgangsmaterials hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten der Versorgungskette. Die in diesem Fall untersuchten Versorgungsketten, weisen eine Preisdifferenz von bis zu 137,3% auf (Tabelle 4.45).

**Tabelle 4.45** Prozentualer Vergleich der Kosten von Versorgungsketten mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien zwischen dem günstigsten und dem teuersten Endprodukt.

Ausgangsmaterial	Verarbeitungsort	Kosten
Holzstämmen	Pelletierung Lateinamerika	0,0%
Holzstämmen	TOP Lateinamerika	0,0%
Holzstämmen	Pelletierung Kanada	1,7%
Holzstämmen	TOP Kanada	1,7%
Holzstämmen	Pelletierung Skandinavien	8,5%
Holzstämmen	TOP Skandinavien	8,5%
composite residue logs	Pelletierung Lateinamerika	26,1%
composite residue logs	Pelletierung Kanada	28,3%
composite residue logs	Pelletierung Skandinavien	35,2%
composite residue logs	TOP Lateinamerika	37,3%
composite residue logs	TOP Kanada	38,6%
composite residue logs	TOP Skandinavien	46,8%
Bündel	Pelletierung Lateinamerika	94,9%
Bündel	Pelletierung Kanada	96,6%
Bündel	Pelletierung Skandinavien	105,1%
Bündel	TOP Lateinamerika	127,1%
Bündel	TOP Kanada	128,8%
Bündel	TOP Skandinavien	137,3%

Zusätzlich zu den Kosten, wird noch die Energiebereitstellungseffizienz bei Verwendung unterschiedlicher Ausgangsmaterialien verglichen. Auch hier gibt es enorme Schwankungen zu verzeichnen. TOP-Pellets aus Skandinavien mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial, weisen eine Energiebereitstellungseffizienz von 94,6% auf, wohingegen Pellets aus Kanada, mit Bündel als Ausgangsmaterial lediglich 73,9% erreichen (Tabelle 4.41).

Sowohl hinsichtlich der Kosten, als auch der Energiebereitstellungseffizienz des Endprodukts, sind Holzstämmen als Ausgangsmaterial am effizientesten.

**Tabelle 4.46** Prozentueller Energiewert des Endprodukts im Laufe der Versorgungskette mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien in Prozent

		LKW	Zug	Pelletierung/ TOP	Schiff	LKW
Bündel	TOP Kanada	99,6%	94,0%	76,7%	74,0%	73,9%
Bündel	TOP Lateinamerika	99,6%	94,0%	76,7%	74,9%	74,8%
Bündel	TOP Skandinavien	99,6%	94,0%	76,7%	76,1%	75,9%
Bündel	Pelletierung Kanada	99,6%	94,0%	83,0%	78,6%	78,4%
Bündel	Pelletierung Lateinamerika	99,6%	94,0%	83,0%	80,0%	79,9%
composite residue logs	Pelletierung Kanada	99,8%	95,8%	85,5%	80,5%	80,4%
Holzstämmen	Pelletierung Kanada	99,8%	96,9%	86,7%	81,2%	81,1%
composite residue logs	TOP Kanada	99,8%	95,8%	84,9%	81,9%	81,7%
composite residue logs	Pelletierung Lateinamerika	99,8%	95,8%	85,5%	82,1%	82,0%
Bündel	Pelletierung Skandinavien	99,6%	94,0%	83,0%	82,2%	82,0%
composite residue logs	TOP Lateinamerika	99,8%	95,8%	84,9%	82,8%	82,7%
Holzstämmen	Pelletierung Lateinamerika	99,8%	96,9%	86,7%	83,0%	82,8%
composite residue logs	TOP Skandinavien	99,8%	95,8%	84,9%	84,1%	84,0%
composite residue logs	Pelletierung Skandinavien	99,8%	95,8%	85,5%	84,7%	84,5%
Holzstämmen	Pelletierung Skandinavien	99,8%	96,9%	86,7%	85,9%	85,7%
Holzstämmen	TOP Kanada	99,8%	96,9%	95,6%	92,2%	92,1%
Holzstämmen	TOP Lateinamerika	99,8%	96,9%	95,6%	93,3%	93,2%
Holzstämmen	TOP Skandinavien	99,8%	96,9%	95,6%	94,8%	94,6%

#### 4.6.4 Gegenüberstellung von Kosten und Energiebereitstellungseffizienz der Ausgangsversorgungsketten

Im Folgenden werden die Kosten sowie die Energiebereitstellungseffizienz der Ausgangsversorgungsketten miteinander verglichen. Diese sind in Tabelle 4.47 aufgelistet.

**Tabelle 4.47** Kosten und Energiebereitstellungseffizienz der Ausgangsversorgungsketten

Produkt	Ursprungsland	Kosten	Energiebereitstellungseffizienz
Pellets	Kanada	7,6	80,4%
Pellets	Lateinamerika	7,4	82,0%
Pellets	Skandinavien	8,0	84,5%
TOP	Kanada	8,2	81,7%
TOP	Lateinamerika	8,1	82,7%
TOP	Skandinavien	8,7	84,0%

**Tabelle 4.48** Differenzbeträge von Energiebereitstellungseffizienz und Kosten der Ausgangsversorgungsketten von TOP-Pellets gegenüber herkömmlichen Pellets

Ursprungsland	Differenzbetrag €/GJ	Energiebereitstellungseffizienz
Kanada	+0,6	+1,4%
Lateinamerika	+0,7	+0,8%
Skandinavien	+0,7	-0,5%

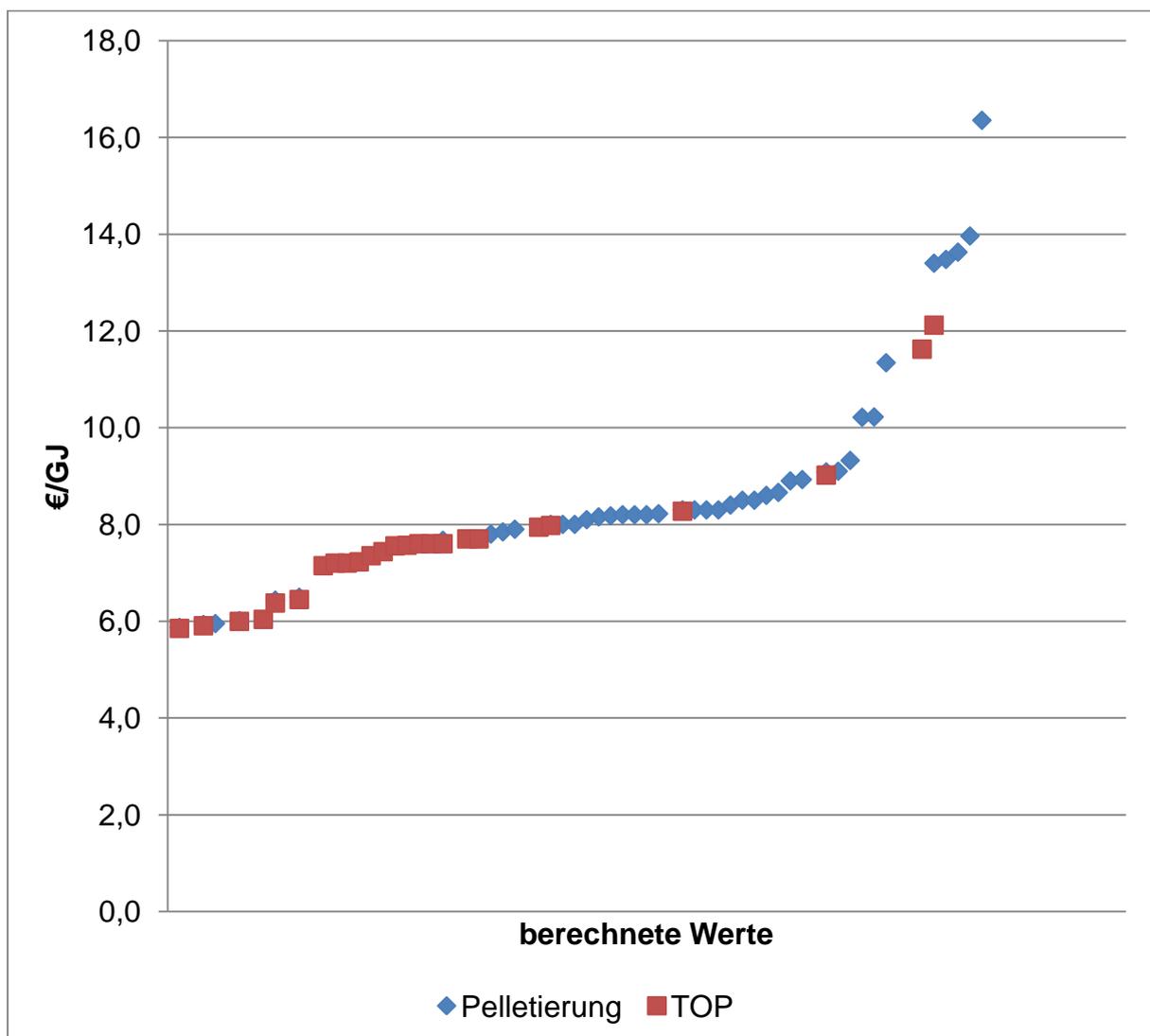
Wie aus Tabelle 4.48 ersichtlich sinkt mit der Transportdistanz das Verhältnis zwischen Kosten und Energiebereitstellungseffizienz. Sind die Kosten für TOP-Pellets aus Kanada gegenüber herkömmlichen Pellets noch um 0,6€/GJ und die Energiebereitstellungseffizienz um 1,4% höher, ist die Bilanz für TOP-Pellets aus Skandinavien negativ. Diese weisen sowohl höhere Kosten als auch eine schlechtere Energiebereitstellungseffizienz auf.

#### 4.6.5 Vergleich aller Ergebnisse

Alle in Kapitel 6 errechneten Werte für die Kosten und die Energiebereitstellungseffizienz, werden nun grafisch dargestellt und analysiert.

Die Kosten für das Endprodukt sind in Abb. 4.28 abgebildet und ergeben eine Preisspanne von 10,5€. Am teuersten sind composite residues logs welche in Kanada zu TOP-Pellets verarbeitet werden, mit einem Preis von 16,4€. Am günstigsten sind Holzstämme welche in Lateinamerika zu TOP-Pellets und Pellets verarbeitet werden, mit einem Preis von 5,9€.

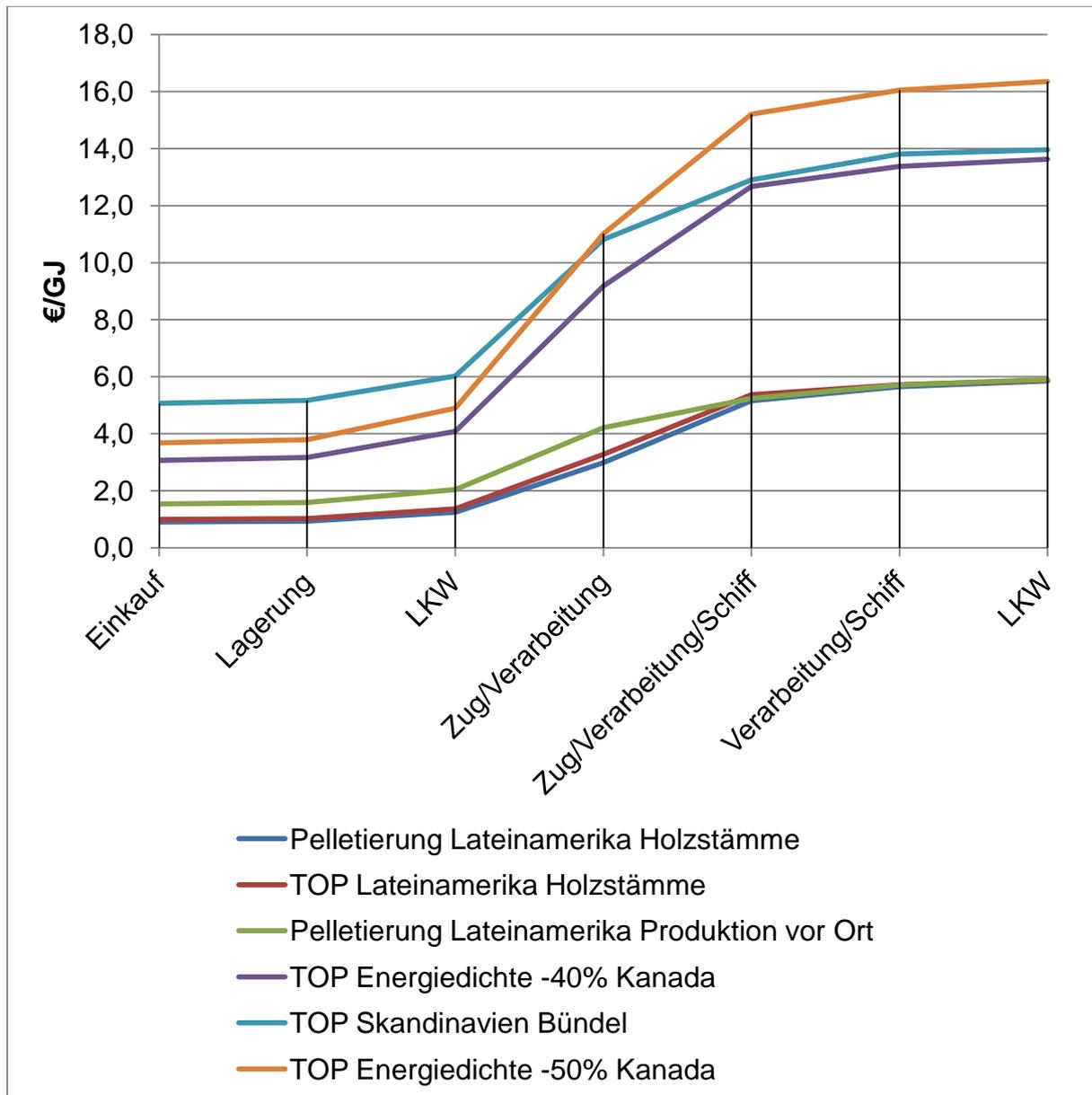
Trotz der höheren Energiedichte erreichen TOP-Pellets im besten Fall denselben Preis wie herkömmliche Pellets.



**Abb. 4.28** Kettenkosten aller berechneten Varianten im direkten Vergleich



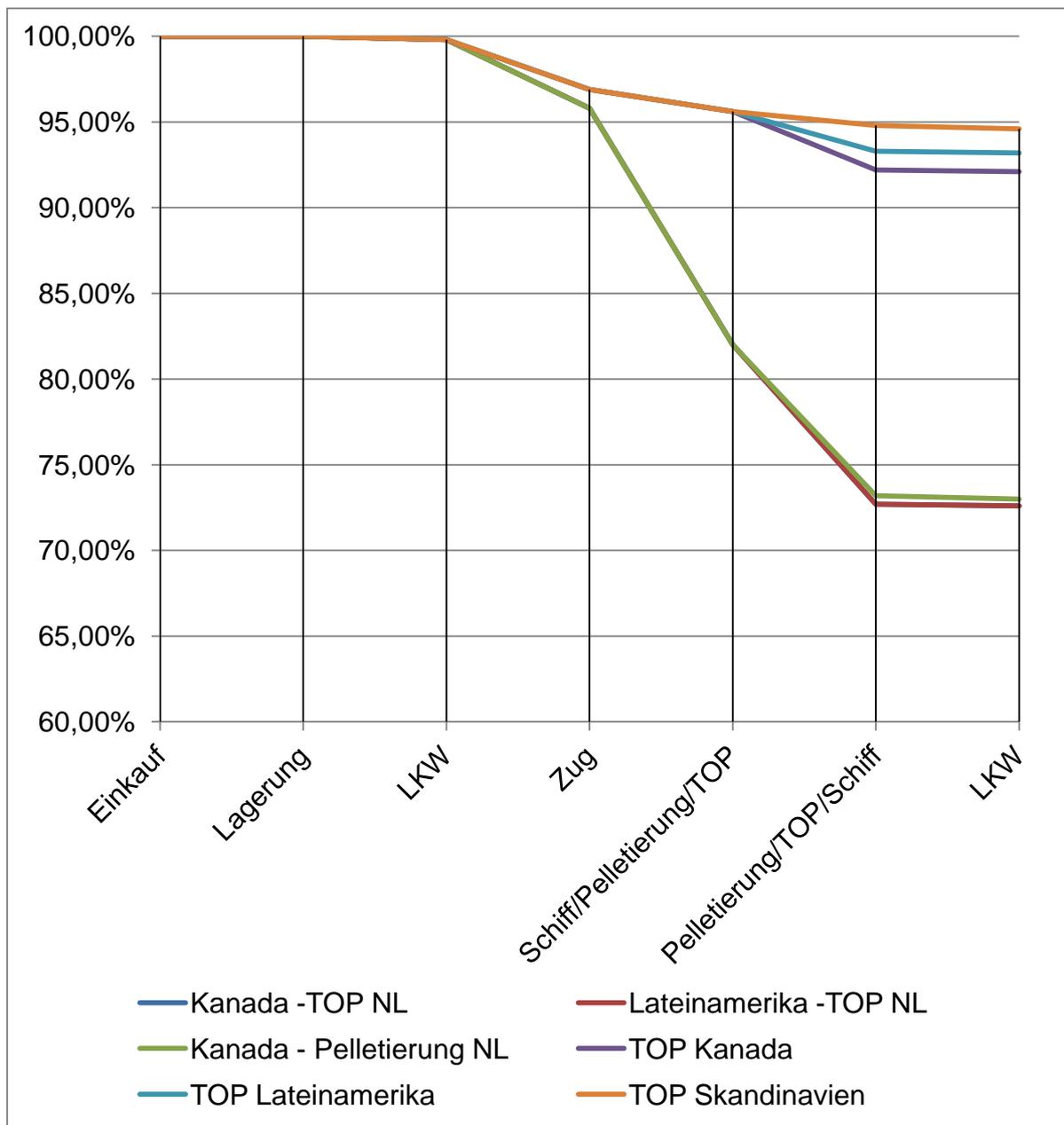
Energiebereitstellungseffizienz von 39,4%. Die niedrigste Energiebereitstellungseffizienz ohne eine Änderung der Energiedichte erreichen TOP-Pellets (Ausgangsmaterial CRLs), welche in den Niederlanden produziert werden und das Ausgangsmaterial aus Kanada importiert wird. Diese haben lediglich eine Energiebereitstellungseffizienz von 72,6%.



**Abb. 4.30** Top 3 der günstigsten und teuersten berechneten Varianten

Die Endpreise aller errechneten Werte liegen für TOP Pellets zwischen 5,4€ und 16,4€. Die teuersten TOP-Pellets (16,4€) sind jene aus Kanada, bei welchen die Energiedichte um 50% niedriger angenommen wurde (siehe Abb. 4.30).

Der Endpreis für Pellets liegt zwischen 5,9€ und 12,1€.



**Abb. 4.31** Top 3 der höchsten und niedrigsten Energiebereitstellungseffizienz aller berechneten Varianten ohne Verringerung der Energiedichte von TOP-Pellets

Die Energiebereitstellungseffizienz ist für TOP-Pellets aus Skandinavien mit 94,6% am höchsten und somit ökologisch am sinnvollsten. CRLs welche von Kanada in die Niederlande transportiert und erst dort zu TOP-Pellets verarbeitet werden, haben lediglich eine Energiebereitstellungseffizienz von 72,6%.

---

## 5 Schlussfolgerung

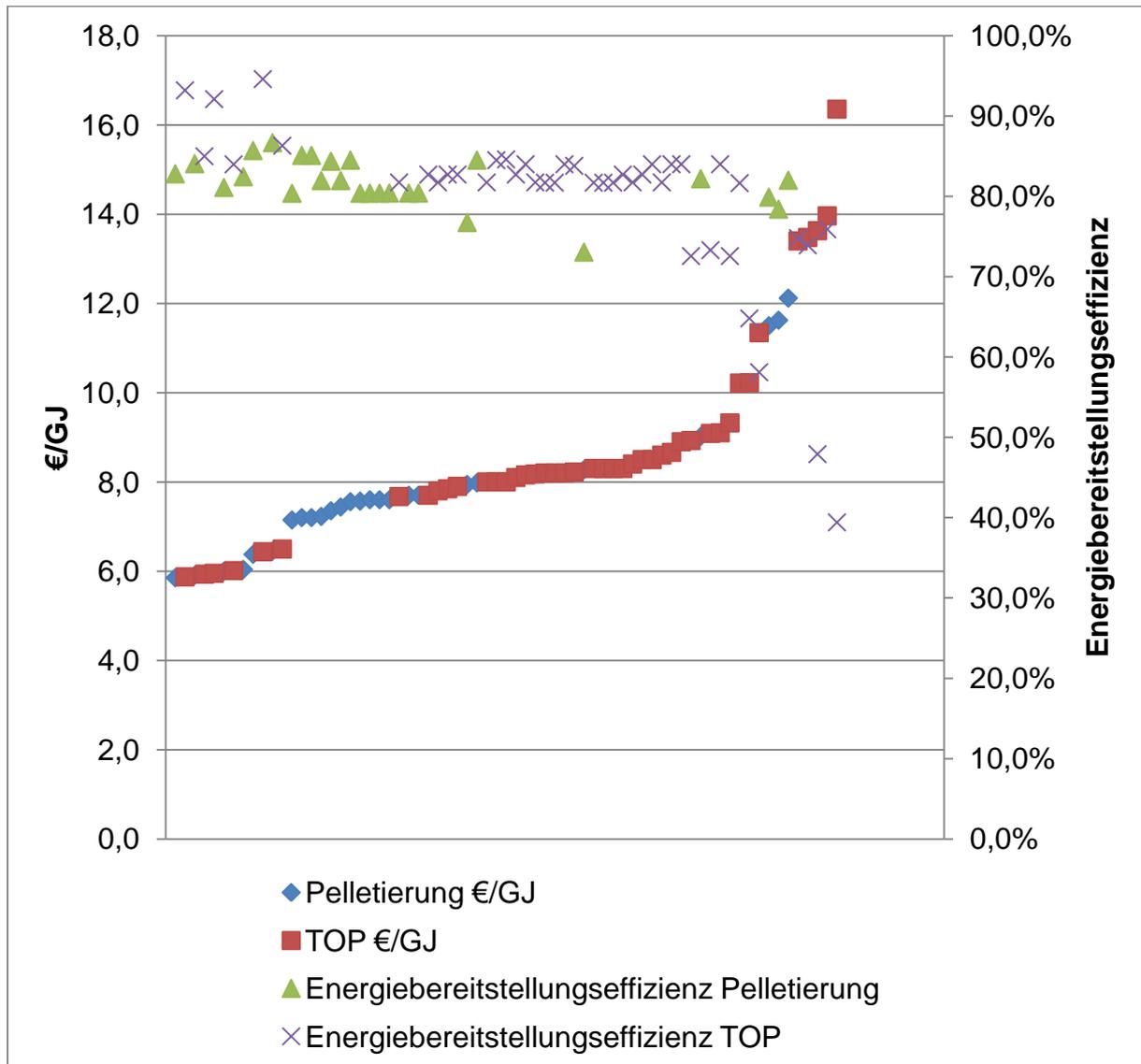
Eine große Anzahl an Ländern benötigt importierte Biomasse, um die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen zu reduzieren. Unbehandelte Biomasse weist eine niedrige Energiedichte auf und verursacht bei Langstreckentransporten hohe Kosten und steigert somit den CO<sub>2</sub> Ausstoß während des Transports. Torrefizierte Biomasse ist für lange Transportwege besser geeignet, da diese eine hohe Energiedichte aufweist und relativ feuchtigkeitsresistent ist.

In dieser Arbeit wurden Biomasseversorgungsketten mit TOP Pellets und herkömmlichen Pellets hinsichtlich der Kosten und der Energiebereitstellungseffizienz verglichen. Die benötigten Daten wurden aus der Literatur erhoben. Die Transportdistanzen der definierten Biomasseversorgungsketten betragen 1.650km, 11.550km und 17.085km, wobei die Niederlande als Zielland definiert wurde. Nachdem TOP bis jetzt nur in Pilotprojekten realisiert wurde, sind noch keine Werte für kommerzielle Anlagen vorhanden. Des Weiteren wurden keine Endnutzeranwendungen in den Biomasseversorgungsketten berücksichtigt. Zur Berechnung der Kosten und Energiebereitstellungseffizienz wurde ein Tool implementiert. Die gesammelten Ergebnisse findet man in Abb. 5.1. Hinsichtlich der Kosten sind herkömmliche Pellets TOP-Pellets vorzuziehen, da diese nie höhere Kosten aufweisen.

Sowohl die Energiebereitstellungseffizienz als auch die Kosten sind von 4 wesentlichen Faktoren abhängig. Dem verwendeten Ausgangsmaterial, dem Verarbeitungsstandort, der Transportdistanz und der Energiedichte des Produkts. Die Berechnung der Energiedichte von TOP-Pellets ergab 21,5GJ/kg und jene für Pellets 18,9GJ/kg für die Ausgangsbiomasseversorgungsketten.

Selbst eine Prozeßkostenreduktion für TOP-Pellets um 20% bringt diesen keinen Kostenvorteil gegenüber herkömmlichen Pellets. Die Wahl der Biomasse, welche für die Produktion verwendet wird, ist ebenfalls kostenentscheidend, da diese im Kaufpreis, der Dichte und des Feuchtegehalts einen wesentlichen Einfluss auf den Transport und die Verarbeitung hat. Bei der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial (Verarbeitung im Hafen) sowie bei der Verarbeitung im

Holzschlägerungsgebiet, sind die Kosten von TOP-Pellets und herkömmlichen Pellets äquivalent.



**Abb. 5.1** Energiebereitstellungseffizienz und Kosten aller berechneten Varianten im direkten Vergleich

Hinsichtlich der Energiebereitstellungseffizienz sind TOP-Pellets herkömmlichen Pellets vorzuziehen. Diese Aussage ist aber nur gültig, wenn die berechnete Energiedichte von 21,5GJ/kg nicht unterschritten wird. Keinesfalls sollte das Ausgangsmaterial ohne vorherige Verarbeitung über große Distanzen (>1.000km) transportiert werden. Durch diesen erhält man lediglich eine Energiebereitstellungseffizienz von 72,6 Prozent bis 76,7 Prozent.

---

Für die untersuchten Fälle sind TOP-Pellets mit Holzstämmen als Ausgangsmaterial, sowie eine Verarbeitung nahe des Holzschlängerungsgebiets (~50km) hinsichtlich Kosten- und Energiebereitstellungseffizienz zu empfehlen. Somit kann TOP für Biomasseversorgungsketten wesentliche ökologische Vorteile bringen und somit z.B. Endbenutzern einen Umstieg von Fossilien- auf Biomassebrennstoffe erleichtern.

---

## 6 Anhang

### 6.1 Literaturverzeichnis

- Andersson, G. (2000). Technology of fuel chip production in Sweden, (208).
- Batidzirai, B., Mignot, A. P. R., Schakel, W. B., Junginger, H. M., & Faaij, A. P. C. (2013). Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2013.09.035
- Bergman, P. C. . (2005, Juli). Combined torrefaction and pelletisation The TOP process. Abgerufen 15. August 2012, von [https://webvpn.tuwien.ac.at/+CSCO+0h756767633A2F2F66707562796E652E7462627479722E6E67++/scholar?hl=de&as\\_sdt=0&q=%3A+Combined+torrefaction+and+pelletisation.+The+TOP+process](https://webvpn.tuwien.ac.at/+CSCO+0h756767633A2F2F66707562796E652E7462627479722E6E67++/scholar?hl=de&as_sdt=0&q=%3A+Combined+torrefaction+and+pelletisation.+The+TOP+process)
- Bergman, P. C., & Kiel, J. H. (2005). Torrefaction for biomass upgrading. In *Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France* (S. 17–21). Abgerufen von <http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--05-180>
- Deutmeyer, M. (2012, November). IEA Bioenergy Task 40 - Sustainable Bioenergy Trade. Abgerufen 18. November 2012, von <http://www.bioenergytrade.org/>
- Energidata, A. S., & Consulting, K. (2005). Bioenergy logistics chain cost structure and development potential. Abgerufen von <http://www.bioenergytrade.org/mobile/320/downloads/bioenergylogisticschainfinalreport.pdf>
- Eurostat - Tables, Graphs and Maps Interface (TGM) table. (2013). Abgerufen 13. September 2013, von <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=tsdcc310&language=de>

- 
- Forsberg, G. (2000). Biomass energy transport. *Biomass and Bioenergy*, 19(1), 17–30. doi:10.1016/S0961-9534(00)00020-9
- Hamelinck, C. N. (2003). International bioenergy transport costs and energy balance. Abgerufen 12. Februar 2013, von <http://www.biofuels-platform.ch/en/media/download.php?get=194>
- Hamelinck, C. N., Suurs, R. A. A., & Faaij, A. P. C. (2005). International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass and Bioenergy*, 29(2), 114–134. doi:10.1016/j.biombioe.2005.04.002
- Hightower, W. G. (1974, Oktober 29). Patent US3844494 - HAMMER MILL ROTOR ASSEMBLY - Google Patente. California. Abgerufen von <https://webvpn.tuwien.ac.at/+CSCO+00756767633A2F2F6A6A6A2E7462627479722E6E67++/patents?hl=de&lr=&vid=USPAT3844494&id=IOw5AAAAEBAJ&oi=fnd&dq=hammer+mill&printsec=abstract#v=onepage&q&f=false>
- Junginger, M., Bolkesjø, T., Bradley, D., Dolzan, P., Faaij, A., Heinimö, J., ... Wit, M. de. (2008). Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, 32(8), 717–729. doi:10.1016/j.biombioe.2008.01.019
- Junginger, M., Faaij, A., Björheden, R., & Turkenburg, W. C. (2005). Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 29(6), 399–418. doi:10.1016/j.biombioe.2005.06.006
- Koppejan, J. (2012, Dezember). Status overview of torrefaction technologies. Abgerufen 25. Februar 2013, von <http://www.ieabcc.nl/>
- Koppejan, J., Sokhansanj, S., Melin, S., & Madrali, S. (2012). IEA\_Bioenergy\_T32\_Torrefaction\_review. Abgerufen von [http://www.ieabcc.nl/publications/IEA\\_Bioenergy\\_T32\\_Torrefaction\\_review.pdf](http://www.ieabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf)
- Larsson, S. H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I., & Samuelsson, R. (2012). Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die

- 
- temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy*. doi:10.1016/j.apenergy.2012.08.046
- Loriot, N. (2012). *Review of Maritime Transport 2012*.
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. doi:10.1016/j.biortech.2010.08.028
- Pierik, J. T. G., & Curvers, A. P. W. M. (1995). *Logistics and pretreatment of biomass fuels for gasification and combustion : contribution to the Joule project : „Energy from biomass: an assessment of two promising systems for energy production“ (Buch, 1995) [WorldCat.org]*. Netherlands: Petten. Abgerufen von <http://www.worldcat.org/title/logistics-and-pretreatment-of-biomass-fuels-for-gasification-and-combustion-contribution-to-the-joule-project-energy-from-biomass-an-assessment-of-two-promising-systems-for-energy-production/oclc/69076768?ht=edition&referer=di>
- Reed, T. B., & Bryant, B. (1978, Juli). *Densified biomass: a new form of solid fuel*. Abgerufen 12. August 2013, von <https://webvpn.tuwien.ac.at/+CSCO+0h75676763663A2F2F63796E6C2E7462627479722E70627A++/store/books/details?id=gAlmWn4WiUkC&rdid=book-gAlmWn4WiUkC&rdot=1>
- Rentizelas, A. A., Tolis, A. J., & Tatsiopoulos, I. P. (2009). Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(4), 887–894. doi:10.1016/j.rser.2008.01.003
- Suurs, R. (2002). Long distance bioenergy logistics. An assessment of costs and energy consumption for various biomass energy transport chains. Abgerufen von [https://www.etde.org/etdeweb/details\\_open.jsp?osti\\_id=20242926](https://www.etde.org/etdeweb/details_open.jsp?osti_id=20242926)

- 
- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Hess, J. R., & Kenney, K. L. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(6), 683–707.
- Uslu, A., Faaij, A. P. C., & Bergman, P. C. A. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206–1223. doi:10.1016/j.energy.2008.03.007

# 6.2 Diplomarbeitposter



FAKULTÄT FÜR INFORMATIK  
Faculty of Informatics

Diplomarbeitpräsentation

## Techno-ökonomische Analyse der Torrefizierung von Biomasse sowie auf Torrefizierung basierender Versorgungsketten

Technische Universität Wien  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
Arbeitsbereich: Energy Economics Group  
Betreuer: Univ.Prof. Dr.Dipl.Ing. Reinhard Haas  
Mitwirkung: Dipl.Ing. Dr. Lukas Kranzl  
Mag. Fabian Schipfler

**Masterstudium:**  
Wirtschaftsingenieurwesen Informatik

Dieter Eidler

### AUFGABENSTELLUNG

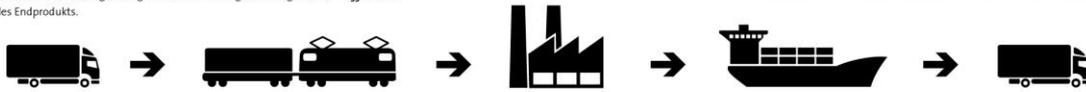
Biomasse bietet die Möglichkeit, die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen und den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu reduzieren. Allerdings verursacht der Import dieses Rohstoffs Kosten und Abgabe. Um die Kosten optimieren und die Abgabe reduzieren zu können, ist es notwendig, das Ausgangsprodukt vor dem Transport zu verarbeiten. Bisher wird Holz als Rohstoff und Pellets als fertiges Produkt transportiert. Eine neue Technologie namens Torrefizierung, ermöglicht eine Erhöhung der Energiedichte des Endprodukts.

*Erwirkt die Torrefizierung von Biomasse hinsichtlich der gesamten Wertschöpfungskette eine Kostenersparnis, oder weist dieses Verfahren Mehrkosten auf?*

*Erwirkt die Torrefizierung von Biomasse hinsichtlich der gesamten Wertschöpfungskette eine verbesserte Energiebereitstellungseffizienz?*

### TORREFIZIERUNG ...

... bezeichnet einen thermischen Vorbehandlungsprozess von Biomasse bei Temperaturen zwischen 200-300°C, bei dem diese durch anschließende Verarbeitung zu Pellets (sogenannte TOP-Pellets) oder Briketts eine wesentlich höhere volumen- und massebezogene Energiedichte aufweist und somit die Energiebereitstellungseffizienz erhöhen soll.



### WISSENSCHAFTLICHE METHODE

Basierend auf Daten der Literatur wurde die Wirtschaftlichkeit von Torrefizierung und anschließender Pelletierung von holzartiger Biomasse im Zuge von Biomasseversorgungsnetzen unter verschiedenen Rahmenbedingungen bewertet und mit konventioneller Pelletierung verglichen. Es wurden exemplarische Fallstudien für Biomasseversorgungsnetzen von torrefizierter Biomasse entwickelt (z.B. Torrefizierung von Holzresten in Kanada, der Versand nach Europa) und Schlussfolgerungen in Bezug auf vernünftige Einsatzmöglichkeiten abgeleitet.

Um die Berechnungen effizienter und schneller durchführen zu können, wurde ein Softwaretool entwickelt. Dieses liest Daten aus einer Datei aus, und ermöglicht die Erstellung unterschiedlicher Biomasseversorgungsnetzen. Der Benutzer gibt die gewünschten Daten in die Benutzeroberfläche ein und überlässt die Berechnung dem Tool. Die Ergebnisse müssen in weiterer Folge nur mehr vom Benutzer analysiert und ausgewertet werden.



### ZENTRALE ERGEBNISSE

Es wurden 3 verschiedene Biomasseversorgungsnetze untersucht:

Kanada ↓ Niederlande	Lateinamerika ↓ Niederlande	Skandinavien ↓ Niederlande
<b>120.000t Biomasse</b>		
Lagerung 50 Tage .....	Lagerung 50 Tage .....	Lagerung 50 Tage .....
50km LKW .....	50km LKW .....	50km LKW .....
500km Zug .....	500km Zug .....	500km Zug .....
Pelletierung bzw. TOP .....	Pelletierung bzw. TOP .....	Pelletierung bzw. TOP .....
16.535km Schiff .....	11.000km Schiff .....	1100km Schiff .....
75km LKW .....	75km LKW .....	75km LKW .....

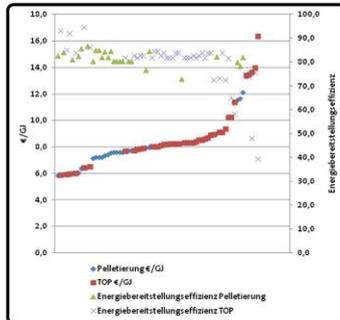


- Variation:**  
Diese drei Versorgungsnetze dienen als Grundlage der Sensitivitätsanalyse.
- Änderung der Pelletierungsstandorte
  - Variation der Transportkosten
  - Variation der verwendeten Biomasse
  - Variation der Energiedichte von TOP-Pellets
  - Variation der TOP-Prozesskosten

### Energiebereitstellungseffizienz und Kosten aller berechneten Varianten im direkten Vergleich:

**Kosten:**  
Für die betrachteten Transportdistanzen sind TOP-Pellets nie kostengünstiger als herkömmliche Pellets. Dies liegt im Masseverlust bei TOP begründet. Nur bei der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial, welche eine hohe Energiedichte aufweisen oder der Verarbeitung von composite residue logs im Holzschlaggerungsgebiet (kürzeste Transportdistanz des Rohmaterials) sind die Kosten von TOP-Pellets äquivalent zu jenen von herkömmlichen Pellets. Sollte aufgrund technologischer Restriktionen nur eine geringere Energiedichte erzielbar sein, sind die Biomasseversorgungsnetzkosten für TOP-Pellets wesentlich höher, als jene für herkömmliche Pellets. Die Realisierung hoher Energiedichten durch diese erst im Demonstrationsstadium befindliche Technologie ist daher von hoher Bedeutung.

**Energiebereitstellungseffizienz:**  
Wenn Biomasse ohne Verarbeitung über große Wegstrecken (über 1.000km) transportiert wird, erhält man lediglich eine Energiebereitstellungseffizienz von 72,6 Prozent bis 76,7 Prozent.  
Aus ökologischer Sicht sind TOP-Pellets (bei der Verwendung von Holzstämmen als Ausgangsmaterial) aus Skandinavien jenen aus Kanada bzw. Lateinamerika vorzuziehen, da diese eine Energiebereitstellungseffizienz von bis zu 94,6 Prozent aufweisen. Für die untersuchten Fälle sind TOP-Pellets hinsichtlich der Energiebereitstellungseffizienz in fast allen Fällen zu empfehlen. Diese Technologie könnte Biomasseversorgungsnetze ökologischer gestalten und somit die ökologische Attraktivität von Biomassebrennstoffen gegenüber fossilen Energieträgern erhöhen.



Kontakt: dieter.eidler@gmx.at