

Lebenszyklusanalyse von waschbaren Windeln und Einwegwindeln



Lebenszyklusanalyse von waschbaren Windeln und Einwegwindeln

Dieser Bericht wurde verfasst von:
Martijn Broeren und Nicole Imholz

Delft, CE Delft, März 2023

Veröffentlichungsnummer:

23.220218.004

Windeln / LCA / Verbrennung / Recycling / Waschen

Auftraggeber: Rijkswaterstaat

Alle öffentlichen Veröffentlichungen von CE Delft finden Sie unter www.ce.nl.

Weitere Informationen über die Studie erhalten Sie von Projektleiter Martijn Broeren (CE Delft)

© copyright, CE Delft, Delft

CE Delft

Engagiert für die Umwelt

CE Delft trägt mit unabhängiger Forschung und Beratung zu einer nachhaltigen Gesellschaft bei. Wir sind führend in den Bereichen Energie, Transport und Rohstoffe. Mit unserem Wissen über Technologie, Politik und Wirtschaft helfen wir Regierungen, NGOs und Unternehmen, strukturelle Veränderungen herbeizuführen. Seit mehr als 40 Jahren arbeiten engagierte und qualifizierte Mitarbeiter bei CE Delft



Inhalt

	Zusammenfassung	3
1	Einführung	11
2	Methode	12
	2.1 Zweck und Anwendungsbereich	12
	2.2 Untersuchte Windeln und Systemgrenzen	14
	2.3 Datenerhebung und Modellierung	17
3	Ergebnisse	22
	3.1 Ergebnisse Umweltindikatoren (pro Veränderung)	22
	3.2 Klimaauswirkungen von Windeln pro Wechsel	26
	3.3 Klimaauswirkungen von Windeln pro Kind, das aufs Töpfchen geht	27
	3.4 Waschbare Windeln: Unterschiede im Verbraucherverhalten	29
	3.5 Auswirkungen des Strommixes auf die Klimaauswirkungen von Windeln	33
4	Auslegung	36
	4.1 Diskussion Annahmen und Ungewissheiten	36
	4.2 Vergleich mit der Meta-Analyse der UN-Studie über die Ökobilanz von Windeln	37
	4.3 Inkontinenzmaterial	39
5	Schlussfolgerung	40
6	Quellen	42
A	Bestandsaufnahme	43
	A.1 Einwegwindel	43
	A.2 Waschbare Windel	44
B	Dominante Faktoren waschbare Windeln	51
C	Einzelne Ergebnisse	53



Zusammenfassung

Die Verwendung von Einweg-Babywindeln in den Niederlanden verursacht einen Abfallstrom von etwa 200 Kilotonnen pro Jahr (VANG Huishoudelijk Afval, 2022). Diese gebrauchten Windeln werden in der Tat vorher verbrannt. Die Abteilung Wasser, Verkehr und Lebensraum (WVL) von Rijkswaterstaat führt im Auftrag des Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft das Windelkettenprojekt durch, um die Umweltauswirkungen von Windeln zu verringern und die Windelkette zirkulärer zu gestalten. Eine Alternative zur Einweg-Babywindel sind waschbare Windeln.

In dieser Ökobilanz untersuchen wir die Umweltauswirkungen der Verwendung von waschbaren Windeln und Einwegwindeln für Babys. Dabei konzentrieren wir uns auf die Verwendung durchschnittlicher Produkte in niederländischen Haushalten. Die Ökobilanz vergleicht drei Windelsysteme:

1. Einwegwindeln werden nach Gebrauch verbrannt (Referenz).
2. Windeln für den einmaligen Gebrauch, die nach Gebrauch durch thermische Druckhydrolyse recycelt werden.
3. Waschbare Windeln, die wiederverwendet werden können.

Die Studie zeigt, dass Einwegwindeln, die verbrannt werden, die größten Umweltauswirkungen haben. Bei waschbaren Windeln wird die Auswirkung durch das Haushaltsverhalten bestimmt. Wenn ein Haushalt über weniger sparsame Geräte verfügt, häufiger kleine Wäsche wäscht und die gesamte Wäsche in den Trockner gibt, haben waschbare Windeln eine höhere Klimabelastung als Einwegwindeln. In umweltbewussten Haushalten mit sparsamen Geräten und effizientem Waschverhalten können waschbare Windeln bis zu viermal besser für die Umwelt sein als Wegwerfwindeln.

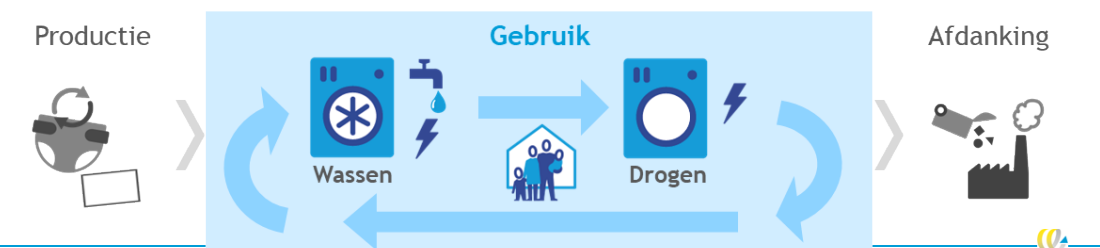
Waschbare Windeln: Umweltauswirkungen durch das Verbraucherverhalten bestimmt
Abbildung 1 zeigt einen Wechsel mit einer Einwegwindel und einer waschbaren Windel.

Abbildung 1 - Überblick über das Wechseln mit Einwegwindeln oder waschbaren Windeln. Bei Einwegwindeln bestimmen die Produktions- und die Entsorgungsphase die Umweltauswirkungen. Bei waschbaren Windeln bestimmen Faktoren in der Nutzungsphase die Umweltauswirkungen, wie z. B. die Energieeffizienz und der Beladungsgrad von Waschmaschinen und möglicherweise Wäschetrocknern

Einmalige luiers



Wasbare luiers



Bei Einwegwindeln entspricht ein Wechsel der Herstellung und Entsorgung (Verbrennung oder Recycling) einer Windel. Für waschbare Windeln werden Stoffwindeln und Papiereinlagen verwendet, die beide für mehrere Wechsel verwendet werden. Aufgrund des Recyclings haben die Produktions- und Entsorgungsphasen von waschbaren Windeln eine begrenzte Umweltbelastung pro Wechsel. Allerdings müssen die Windeln nach jedem Wechsel gewaschen und getrocknet werden. Der Strom-, Wasser- und Waschmittelverbrauch hierfür hängt davon ab, welche Waschmaschine und welchen Trockner ein Haushalt verwendet (z. B. sparsam oder nicht), und von den Entscheidungen der Eltern.

Für das Waschen und Trocknen von waschbaren Windeln wurde ein Basisszenario erstellt, das auf Daten und Annahmen über das typische Waschverhalten niederländischer Haushalte beruht, z. B. eine durchschnittliche Beladung der Waschmaschine, Waschen bei 40 °C und Trocknen der Hälfte der Wäsche in der Maschine. Das Basisszenario ist nicht repräsentativ für alle Haushalte.

Wir betrachten daher auch zwei Szenarien mit hohen und niedrigen Umweltauswirkungen, in denen das Verhalten der Haushalte und die verwendeten Geräte geändert werden. Diese beiden Szenarien zeigen die Bandbreite, in der die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln variieren können.

Lebenszyklusanalyse für ein Wickelkind und ein Kind, das aufs Töpfchen geht

Um die Umweltauswirkungen von Windeln zu ermitteln und zu vergleichen, konzentrieren wir uns auf eine Veränderung (die funktionelle Einheit). Darüber hinaus betrachten wir auch die Umweltauswirkungen aller Veränderungen während der Windelperiode eines Kindes (zusätzliche funktionelle Einheit).

Die Umweltauswirkungen wurden anhand der ReCiPe 2016 (H)-Methodik berechnet. Der Schwerpunkt dieser Analyse liegt auf den Klimaauswirkungen ("Kohlenstoff-Fußabdruck") bzw. dem Beitrag zum Klimawandel durch Treibhausgasemissionen. Die Analyse wird nach den Normen ISO14040 und ISO14044 für Ökobilanzen durchgeführt.

Ergebnisse

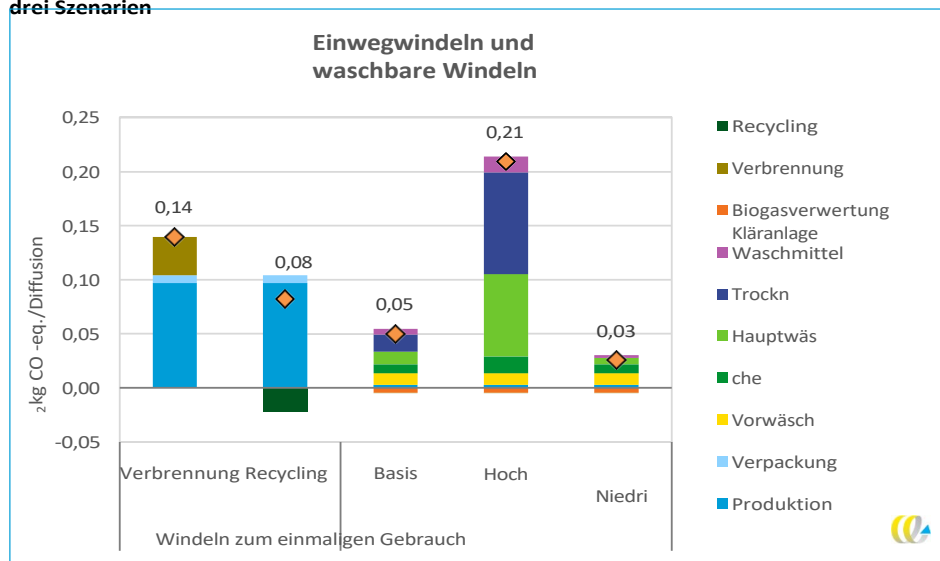
Bei den meisten Umweltauswirkungen hat die waschbare Windel eine geringere Auswirkung als Einwegwindeln, die verbrannt werden. Die Auswirkungen, bei denen die waschbare Windel eine deutlich höhere Umweltbelastung aufweist, sind der Wasserverbrauch, die Süßwasserökotoxizität und die Eutrophierung von Süß- und Salzwasser. Umgerechnet auf die Schadenskategorien oder "Endpunkte" (menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen) schneidet die waschbare Windel in jeder Schadenskategorie besser ab als Einwegwindeln. Die Umweltauswirkungen von Einwegwindeln, die recycelt werden, liegen bei den meisten Umweltauswirkungen zwischen waschbaren Windeln und Einwegwindeln, die verbrannt werden.

Abbildung 2 zeigt die Klimaauswirkungen der verschiedenen Windelsysteme. Wenn Einwegwindeln recycelt werden, sinkt die Klimabelastung im Vergleich zur Verbrennung um 41 %. Im Basisszenario für waschbare Windeln ist die Klimabelastung etwa 64 % geringer als bei der Verbrennung von Einwegwindeln.

Die Ergebnisse für waschbare Windeln können jedoch von einem Haushalt zum anderen stark variieren. Waschbare Windeln haben die höchste Klimabelastung, wenn man davon ausgeht, dass die Windeln separat mit einer verbrauchsintensiven Waschmaschine und einem Trockner gewaschen werden. In diesem Szenario mit hoher Klimabelastung ist die Klimabelastung 50 % höher als bei der Verbrennung von Einwegwindeln. In einem günstigen Szenario mit geringen Auswirkungen (Waschmaschine mit durchschnittlichem Verbrauch, die voll gefüllt ist und auf der Leine trocknet) ist die Klimabelastung 82 % geringer als bei der Verbrennung von Einwegwindeln.



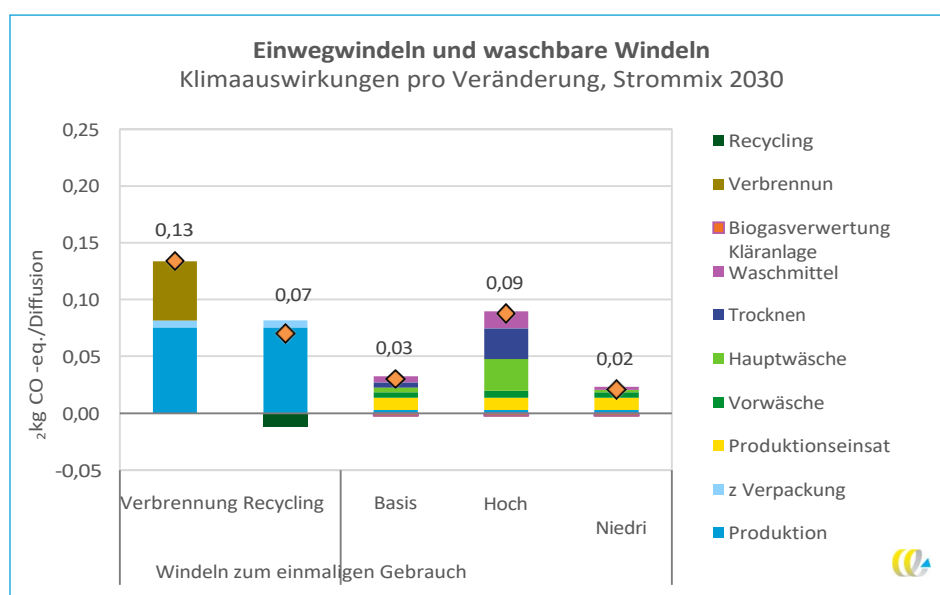
Abbildung 2 - Klimaauswirkungen von Einwegwindeln (Verbrennung oder Recycling) und waschbaren Windeln in drei Szenarien



Ergebnisse mit Strommix 2030

Die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln werden weitgehend durch den Stromverbrauch beim Waschen und Trocknen bestimmt. In der Hauptanalyse (Abbildung 2) haben wir mit dem niederländischen Strommix 2019 gerechnet, bei dem 76 % mit fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle erzeugt werden (CE Delft, 2022). Wenn wir von einem saubereren Strommix im Jahr 2030 ausgehen, fallen die Klimaauswirkungen des Szenarios mit hohen Auswirkungen *unter die* der Verbrennung von Einwegwindeln (Abbildung 3). Mit Recycling schneiden die Einwegwindeln jedoch immer noch besser ab als das Szenario mit den hohen Auswirkungen von waschbaren Windeln.

Abbildung 3 - Einwegwindeln und waschbare Windeln haben bei dem für 2030 prognostizierten Strommix geringere Klimaauswirkungen als beim Strommix von 2019 (Abbildung 2)



Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln hängen stark davon ab, wie ein Haushalt seine Wäsche wäscht, während die Produktions- und Entsorgungsphasen weniger wichtig sind. Die Auswirkungen von waschbaren Windeln werden hauptsächlich durch die Beladung der Waschmaschine und des Trockners, den Stromverbrauch der Geräte, die Anzahl der Wiederverwendungen und die Verwendung von Einlagen bestimmt. Andere Faktoren (einschließlich der Seifendosierung, der Zusammensetzung der Windeln und der Waschttemperatur) haben keinen großen Einfluss auf die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln.

Für die niederländischen Haushalte wurde eine Reihe von Empfehlungen abgeleitet:

- Auch ohne sparsame Ausstattung haben waschbare Windeln eine geringere Klimabelastung als Wegwerfwindeln. Höhere Maschinenbelastungen verringern die Auswirkungen.
- Das separate Waschen von Windeln erhöht die Klimabelastung erheblich. Wir empfehlen, die Windeln mit anderer Wäsche in einer Vollwaschmaschine zu waschen (eventuell nach separatem Spülen).
- Wenn ein Haushalt über einen ineffizienten Wäschetrockner verfügt, wird viel für die Umwelt getan, wenn er nicht benutzt wird. Wir empfehlen, Windeln auf einer Wäscheleine zu trocknen.
- Je länger waschbare Windeln verwendet werden, desto geringer ist die Umweltbelastung pro Wechsel. Bei umweltfreundlichem Waschverhalten haben waschbare Windeln ab drei Monaten eine geringere Klimabelastung als Einwegwindeln, die recycelt werden.



Zusammenfassung

Die Verwendung von Wegwerf-Babywindeln in den Niederlanden erzeugt jährlich etwa 200 Kilotonnen Abfall (VANG Huishoudelijk Afval, 2022). Diese gebrauchten Windeln werden hauptsächlich verbrannt. Im Auftrag des Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft führt Rijkswaterstaat ein Windel-Wertschöpfungskettenprojekt durch, das darauf abzielt, die Umweltauswirkungen von Windeln zu verringern und die Kreislaufwirtschaft zu verbessern. Eine Alternative zu Wegwerfwindeln für Babys sind waschbare Windeln.

In dieser Ökobilanz bewerten wir die Umweltauswirkungen der Verwendung von waschbaren Windeln und Wegwerfwindeln. Wir konzentrieren uns auf die Verwendung von Durchschnittsprodukten in niederländischen Haushalten. In der Ökobilanz werden drei Windelsysteme verglichen:

1. Wegwerfwindeln, die nach Gebrauch verbrannt werden (Referenz).
2. Wegwerfwindeln, die durch thermische Druckhydrolyse recycelt werden.
3. Waschbare Windeln, die wiederverwendet werden.

Die Analyse zeigt, dass Wegwerfwindeln, die verbrannt werden, den größten ökologischen Fußabdruck haben. Bei waschbaren Windeln bestimmt das Verbraucherverhalten die Umweltauswirkungen. Wenn ein Haushalt über wenig effiziente Geräte verfügt, häufig kleinere Wäsche wäscht und für die gesamte Wäsche einen Trockner verwendet, haben waschbare Windeln einen höheren CO₂-Fußabdruck (bis zu 50 %) als Einwegwindeln. In umweltbewussten Haushalten mit effizienteren Geräten und besserem Waschverhalten können waschbare Windeln die Umwelt bis zu viermal weniger belasten als Wegwerfwindeln.

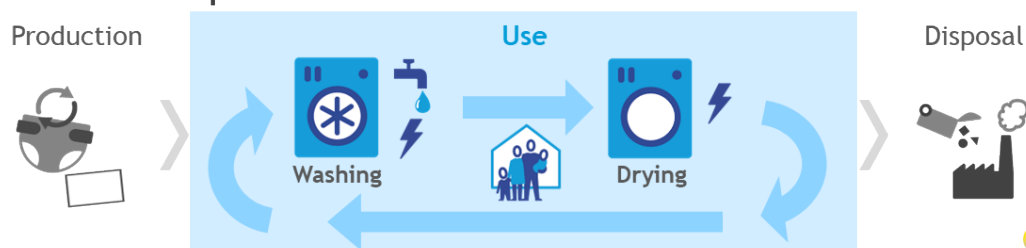
Waschbare Windeln: Umweltauswirkungen werden durch das Verbraucherverhalten bestimmt Der Windelwechsel mit Wegwerfwindeln oder waschbaren Windeln ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4 - Überblick über den Windelwechsel mit Einweg- oder waschbaren Windeln. Bei Wegwerfwindeln werden die Umweltauswirkungen durch die Produktions- und Entsorgungsphase bestimmt. Bei waschbaren Windeln bestimmt die Nutzungsphase die Umweltauswirkungen, einschließlich der Energieeffizienz und der Belastungsfaktoren von Waschmaschinen und Trocknern

Disposable diaper



Washable diaper



Bei Wegwerfwindeln muss bei jedem Windelwechsel eine Windel hergestellt und entsorgt werden. Bei waschbaren Windeln werden Stoffwindeln und Papiereinlagen verwendet, die mehrfach verwendet werden können. Aufgrund der Wiederverwendung haben die Produktions- und Entsorgungsphasen nur geringe Umweltauswirkungen. Allerdings müssen die Windeln nach jedem Wechsel gewaschen und getrocknet werden. Der Strom-, Wasser- und Waschmittelverbrauch für diesen Schritt hängt von der im Haushalt verwendeten Waschmaschine und dem Wäschetrockner (z. B. energieeffizient oder nicht) sowie von den Entscheidungen der Eltern ab.

Für das Waschen und Trocknen von waschbaren Windeln wurde ein Basisszenario erstellt, das auf Daten und Annahmen über das typische Waschverhalten niederländischer Haushalte beruht, z. B. durchschnittliche Beladungsfaktoren, Waschen bei 40 °C und Trocknen der Hälfte der Wäsche mit einem Wäschetrockner. Das Basisszenario ist nicht für alle Haushalte repräsentativ. Daher werden auch zwei Szenarien mit hohem und niedrigem Umweltaspekt einbezogen, in denen das Haushaltsverhalten und die verwendeten Geräte verändert werden. Diese Szenarien veranschaulichen die Bandbreite, innerhalb derer die Umweltauswirkungen von Windeln variieren können.

Um die Umweltauswirkungen von Windeln zu ermitteln und zu vergleichen, konzentrieren wir uns auf einen Windelwechsel (die funktionelle Einheit). Darüber hinaus bewerten wir auch die Umweltauswirkungen aller Windelwechsel während der Wickelperiode eines Kindes (zusätzliche funktionelle Einheit). Die Umweltauswirkungen werden mit der Methode ReCiPe 2016 (H) ermittelt. Der Fokus dieser Studie liegt auf dem Carbon Footprint, d.h. dem Beitrag zum Klimawandel durch die Emissionen von Treibhausgasen. Die Ökobilanz wird gemäß ISO14040 und ISO14044 durchgeführt.

Ergebnisse

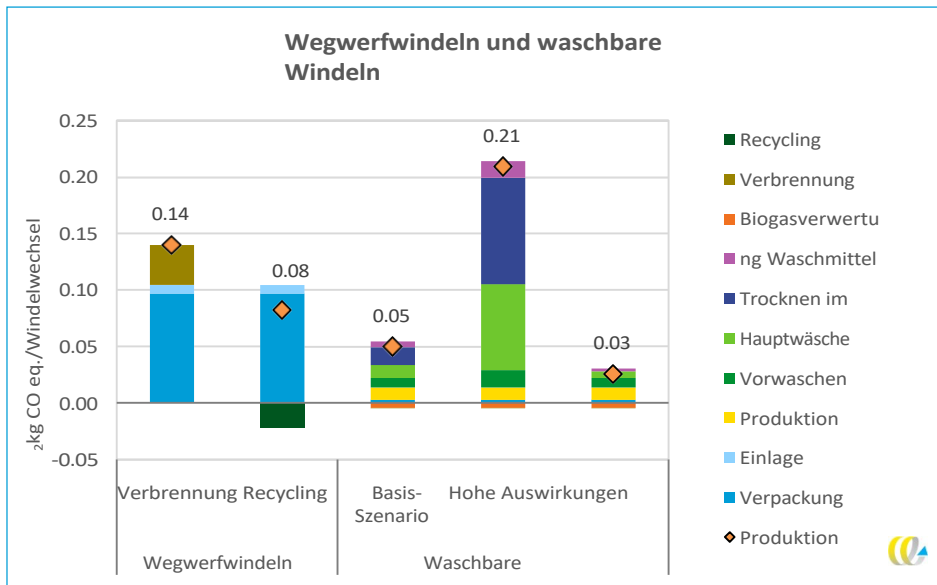
Im Vergleich zu Einwegwindeln, die verbrannt werden, haben waschbare Windeln in den meisten Umweltkategorien geringere Auswirkungen. Zu den Umweltkategorien, für die waschbare Windeln eine höhere Auswirkung haben, gehören der Wasserverbrauch, die Ökotoxizität von Süßwasser sowie die Eutrophierung von Süßwasser und Meer. Für alle Schadenskategorien oder "Endpunkte" (menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen) haben waschbare Windeln geringere Auswirkungen als Wegwerfwindeln. Die Umweltauswirkungen von recycelten Wegwerfwindeln liegen in den meisten Umweltkategorien zwischen den Auswirkungen von waschbaren Windeln und verbrannten Wegwerfwindeln.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der CO₂-Bilanz der verschiedenen Windelsysteme. Das Recycling der Wegwerfwindeln nach dem Gebrauch reduziert den Kohlenstoff-Fußabdruck um 41 % im Vergleich zur Verbrennung der Wegwerfwindeln. Im Basisszenario für waschbare Windeln ist der Kohlenstoff-Fußabdruck etwa 64 % geringer als der von Wegwerfwindeln, die verbrannt werden.

Die Ergebnisse für waschbare Windeln können jedoch von Haushalt zu Haushalt stark variieren. Den höchsten Kohlenstoff-Fußabdruck haben waschbare Windeln, wenn wir davon ausgehen, dass die Windeln separat in einer Waschmaschine und einem Wäschetrockner mit hohem Energieverbrauch gewaschen werden. In diesem Szenario mit hoher Umweltbelastung ist der Kohlenstoff-Fußabdruck von waschbaren Windeln etwa 50 % höher als der von Wegwerfwindeln, die verbrannt werden. Im Szenario mit geringen Auswirkungen (Verwendung einer Waschmaschine mit durchschnittlicher Energieeffizienz, hohem Beladungsgrad und ohne Trockner) ist der Kohlenstoff-Fußabdruck im Vergleich zu Einwegwindeln, die verbrannt werden, etwa 82 % geringer.



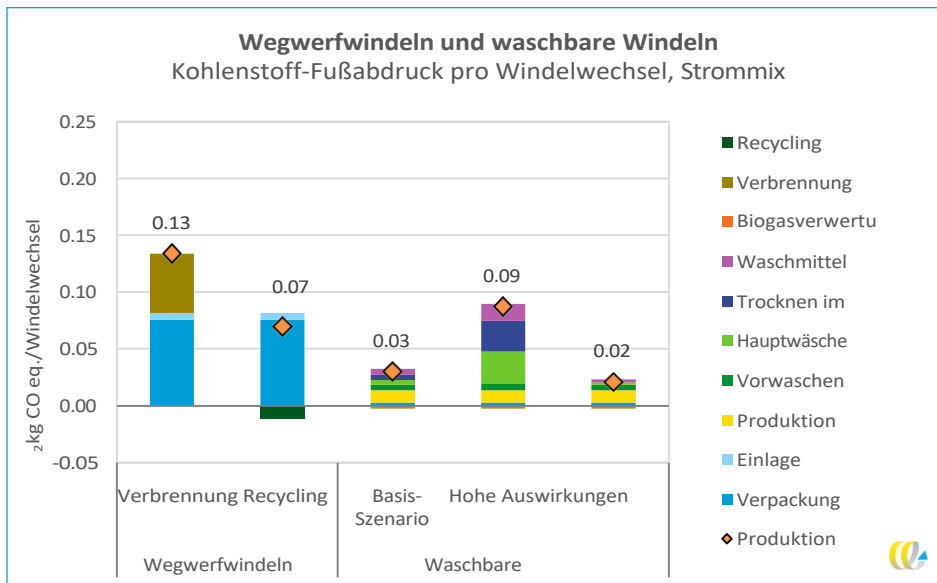
Abbildung 5 - Kohlenstoff-Fußabdruck von Wegwerfwindeln (Verbrennung oder Recycling) und waschbaren Windeln in drei Szenarien



Ergebnisse mit dem Strommix 2030

Der Kohlenstoff-Fußabdruck von waschbaren Windeln wird stark durch den Stromverbrauch beim Waschen und Trocknen beeinflusst. In der Hauptanalyse (Abbildung 5) wurde der niederländische Strommix für 2019 verwendet, der zu 76 % aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle besteht (CE Delft, 2022). Wenn wir von einem saubereren Strommix im Jahr 2030 ausgehen, sinkt der Kohlenstoff-Fußabdruck des Szenarios mit starken Auswirkungen unter denjenigen von Wegwerfwindeln, die verbrannt werden (Abbildung 6). Wenn sie recycelt werden, können Wegwerfwindeln immer noch eine bessere Umweltbilanz aufweisen als das Szenario mit hohen Auswirkungen für waschbare Windeln.

Abbildung 6 - Wegwerfwindeln und waschbare Windeln haben einen geringeren Kohlenstoff-Fußabdruck, wenn der für 2030 erwartete Strommix im Vergleich zum Strommix von 2019 verwendet wird (Abbildung 5)



Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Der Kohlenstoff-Fußabdruck von waschbaren Windeln hängt stark davon ab, wie die Haushalte ihre Wäsche waschen, während die Produktions- und Entsorgungsphasen weniger wichtig sind. Die Auswirkungen von waschbaren Windeln werden hauptsächlich durch den Beladungsgrad der Waschmaschine und des Trockners, den Stromverbrauch der Geräte, die Menge der wiederverwendeten Windeln und die Verwendung von Einlagen bestimmt. Andere Aspekte (einschließlich der Menge des verwendeten Waschmittels und der Waschtemperatur) haben keinen großen Einfluss auf den Kohlenstoff-Fußabdruck von waschbaren Windeln.

Für niederländische Haushalte wurden eine Reihe von Empfehlungen abgeleitet:

- Auch ohne energieeffiziente Geräte haben waschbare Windeln einen geringeren ökologischen Fußabdruck als Wegwerfwindeln. Höhere Ladefaktoren verringern die Umweltbelastung.
- Das Waschen von Windeln getrennt von anderer Wäsche erhöht den CO₂-Fußabdruck erheblich. Wir empfehlen, die Windeln zusammen mit anderer Wäsche in einer vollen Waschmaschine zu waschen (optional nach dem Spülen der Windeln in einem separaten Programm).
- Bei ineffizienten Trocknern kann die Umweltbelastung durch waschbare Windeln erheblich gesenkt werden, wenn sie nicht verwendet werden. Wir empfehlen stattdessen die Lufttrocknung.
- Eine höhere Wiederverwendung führt zu geringeren Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln. Beim Waschen haben waschbare Windeln eine geringere Auswirkung auf die Umwelt als Wegwerfwindeln, die ab dem dritten Monat der Nutzung recycelt werden.



1 Einführung

Die Verwendung von Einweg-Babywindeln verursacht in den Niederlanden einen Abfallstrom von 200 Kilotonnen pro Jahr (VANG Huishoudelijk Afval, 2022). Diese gebrauchten Windeln werden hauptsächlich verbrannt. Die Abteilung WVL von Rijkswaterstaat (RWS) führt das Windelkettenprojekt im Auftrag des Ministeriums für Infrastruktur und Wasserwirtschaft durch. Dieses Kettenprojekt ist Teil des Kettenansatzes des regierungsweiten Programms für Kreislaufwirtschaft. Das Kettenprojekt konzentriert sich auf alle R-Schritte, um eine Kreislaufkette näher zu bringen.

¹Ein Beispiel für den Schritt R2 (Wiederverwendung) ist die Verwendung von waschbaren Windeln. Waschbare Windeln bestehen aus anderen Materialien als Wegwerfwindeln und werden nach dem Gebrauch natürlich auch anders behandelt. Bei waschbaren Windeln werden die Umweltauswirkungen größtenteils durch den Waschvorgang bestimmt, während die Materialherstellung eine geringere Rolle spielt. Diese Umweltbelastung hängt wiederum von Faktoren wie der Sparsamkeit und Auslastung der Waschmaschine und der Art der verwendeten Energie ab.

Die potenziellen Umweltvorteile von waschbaren Windeln im Vergleich zu Einwegwindeln wurden bereits in einem internationalen Kontext untersucht und u. a. von der UNO zusammengefasst (UNEP, 2021). Da eine Studie im niederländischen Kontext noch fehlt, wurde CE Delft gebeten, eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchzuführen.

Diese Ökobilanz vergleicht drei Arten von Kombinationen für die Handhabung von Windeln:

1. Einwegwindeln werden nach Gebrauch verbrannt (Referenz).
2. Windeln für den einmaligen Gebrauch, die nach Gebrauch durch thermische Druckhydrolyse recycelt werden.
3. Waschbare Windeln, die wiederverwendet werden können.

¹ In früheren Studien wurden bereits die Umweltauswirkungen der Verbrennung oder des Recyclings von

weggeworfenen Windeln und Inkontinenzmaterialien verglichen (SGS Search, 2021, CE Delft, 2018a). Diese Ökobilanz untersucht eine höhere Stufe auf der R-Leiter: die Wiederverwendung mit waschbaren Windeln.



2 Methode

2.1 Zweck und Anwendungsbereich

Ziel der Analyse ist es, die Umweltauswirkungen der Verwendung von waschbaren Windeln und Einwegwindeln über den gesamten Lebenszyklus einer Windel zu vergleichen. Wir konzentrieren uns auf die Verwendung in den Niederlanden durch Haushalte.

Zur Ermittlung der Umweltauswirkungen verwenden wir die Indikatoren der ReCiPe 2016 (H)-Methodik. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Auswirkungen auf das Klima ("Carbon Footprint") bzw. dem Beitrag zum Klimawandel durch Treibhausgasemissionen.

Die Analyse wird gemäß den Normen ISO14040 und ISO14044 für Ökobilanzen durchgeführt. Die Ökobilanz berücksichtigt die Mehrfachnutzungszyklen von wiederverwendbaren Produkten, die auf der R-Leiter höher stehen als Einwegprodukte.

Der Nationale Abfallwirtschaftsplan (LAP3) definiert eine Methode für eine Mehrzyklus-LCA (mLCA) für Abfallströme mit einer bestimmten Zusammensetzung (RWS, 2021). Diese Methode kann auf Einwegprodukte angewendet werden, deren Abfallstrom auf unterschiedliche Weise behandelt werden kann. Für einen Vergleich zwischen Einmal- und Mehrwegprodukten ist die Methode jedoch (noch) nicht geeignet, da die mLCA immer mit weggeworfenen Produkten/Abfallströmen "beginnt", die verarbeitet werden müssen. Die Wiederverwendung ist hier keine Option.

Die hier angewandte Methode berücksichtigt (im Gegensatz zur mLCA-Methode) die mehrfachen Nutzungszyklen und die Produktionsphase der Produkte, da dies wichtige Aspekte für einen fairen Vergleich zwischen den Alternativen sind.

Untersuchte Windelsysteme

Wir untersuchen drei Systeme:

1. Einwegwindeln werden nach Gebrauch verbrannt (Referenz).
2. Windeln für den einmaligen Gebrauch, die nach Gebrauch durch thermische Druckhydrolyse recycelt werden.
3. Waschbare Windeln, die wiederverwendet werden können.

Bei Einwegwindeln handelt es sich um eine durchschnittliche Babywindel mit einem Gewicht von etwa 33 Gramm, die hauptsächlich aus Zellstoff, superabsorbierenden Polymeren (SAP) und Kunststoff besteht (EDANA, 2015). Derzeit landen die aktuellen Windeln häufig in Müllverbrennungsanlagen (ARA), wie im ersten (Referenz-)System untersucht. Alternativ können sie durch thermische Druckhydrolyse recycelt werden, wie zuvor von CE Delft (2018a) und SGS Search (2021) untersucht. Für waschbare Windeln betrachten wir eine 130 Gramm schwere All-in-One-Babywindel, die aus Kunststoff, Baumwolle und Bambusviskose besteht. Bei waschbaren Windeln werden Einlagen verwendet. Die Windelsysteme werden in den Abschnitten 2.2 und 2.3 näher erläutert.

Abgrenzung

Die Studie betrachtet den gesamten Lebenszyklus von Windeln ("von der Wiege bis zur Bahre"). Das bedeutet, dass alle Schritte berücksichtigt werden, von der



Rohstoffgewinnung und der Produktion bis hin zur Verwendung und der Abfallentsorgung nach dem Wegwerfen (*End-of-Life*; EOL). Die Studie geht ferner von einer Verwendung in den Niederlanden in der derzeitigen Situation (2022) aus.



Wir ermitteln die Umweltauswirkungen von Babywindeln und nicht von anderen Inkontinenzmaterialien. Wir betrachten die Umweltauswirkungen von Inkontinenzmaterialien qualitativ in Kapitel 4.

Einzelheiten zu den Systemgrenzen werden in Abschnitt 2.2 erläutert.

Funktionelle Einheit

Die funktionale Einheit spiegelt die Funktion des untersuchten Systems wider und gewährleistet, dass alle verschiedenen Prozesse oder Produkte vergleichbar sind. In dieser Studie ist die funktionale Einheit *ein Windelwechsel bei einem Kind*.

Bei der waschbaren Windel berücksichtigen wir die Wiederverwendung der Windel, indem wir die Auswirkungen der Produktions- und End-of-Life-Phase durch die Anzahl der Wiederverwendungen von der Geburt bis zum Töpfchentraining dividieren. So kann ein Windelwechsel von einem Einwegsystem mit einem Mehrwegsystem verglichen werden.

Ausgehend von einem Windelwechsel berechnen wir dann in Abschnitt 3.3 die gesamten Umweltauswirkungen der Erziehung eines Kindes. Dies geschieht, um die Ergebnisse pro Windelwechsel zu relativieren.

Szenarien für das Waschen

Bei waschbaren Windeln hängt die Umweltbelastung stark davon ab, wie die Windeln gewaschen werden. Wir haben daher ein Basisszenario erstellt, um die durchschnittliche/beabsichtigte Verwendung von waschbaren Windeln zu modellieren. In sechs alternativen Szenarien betrachten wir die Auswirkungen verschiedener Situationen, wie z. B. das Waschen bei einer höheren Temperatur, das separate Waschen von Windeln und eine weniger effiziente Waschmaschine. Das Basisszenario wurde mit Hilfe der Verbrauchervereinigung (Consumers' Association, 2018) und mit Beiträgen der Wissensplattform "The Washable Diaper World" (Kliphuis, 2022) erstellt.

Nebenerzeugnisse und Zuteilung

Bei den drei Windelsystemen werden unterschiedliche Nebenprodukte erzeugt. Bei der Verbrennung in niederländischen Verbrennungsanlagen werden Strom und Wärme erzeugt, beim Recycling werden Kunststoffe zurückgewonnen und Biogas erzeugt, und bei waschbaren Windeln wird ebenfalls mehr Biogas erzeugt (in Kläranlagen).

²Um dies in der Ökobilanz zu berücksichtigen, gehen wir davon aus, dass die Nebenprodukte die reguläre Produktion der gleichen Menge eines Produkts verhindern. Da zum Beispiel durch die Verbrennung von Windeln Strom erzeugt wird, müssen reguläre Kraftwerke weniger produzieren. Die Umweltauswirkungen, die bei dieser regulären Produktion entstanden wären, werden abgezogen. Dies wird auch als Substitution bezeichnet. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden die Nebenprodukte des Windelsystems ausführlicher behandelt.

² Diese Substitutionsüberlegung ist eine Form der Systemerweiterung gemäß den ISO-LCA-Normen, da auch



vermiedene Prozesse zu den Systemgrenzen hinzugefügt werden. Die Systemerweiterung ist eine Möglichkeit, die Allokation zu vermeiden (ISO, 2006a, 2006b).



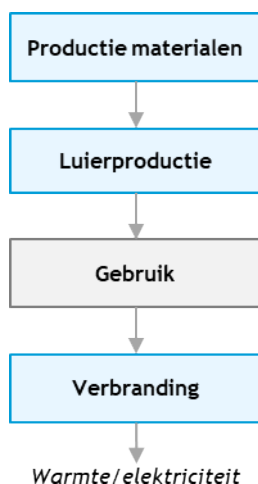
2.2 Untersucht Windeln und Systemgrenzen

2.2.1 Einmaliges Wickeln und Verbrennen

Der Lebenszyklus von Wegwerfwindeln und Verbrennung ist in Abbildung 7 vereinfacht dargestellt. Die Ökobilanz von Wegwerfwindeln beginnt mit der Gewinnung von Rohstoffen und der Herstellung der Materialien für Windel und Verpackung. Die Materialien werden dann zur Windel verarbeitet. Der Transport zu den Einzelhändlern und zu den Verbrauchern wurde nicht in die Studie einbezogen, da zuvor gezeigt wurde, dass dieser Schritt im Vergleich zu den anderen Schritten vernachlässigbar ist (CE Delft, 2018a). Während der Nutzung der Windel und des Wechsels entstehen keine Umweltauswirkungen.

Die Abfallphase (EOL) von Wegwerfwindeln umfasst das Einsammeln der gebrauchten Windeln per LKW und den Transport zu den Kläranlagen. Bei der Verbrennung in der Kläranlage werden Wärme und Strom erzeugt. Dies wurde auf der Grundlage der durchschnittlichen Energieeffizienz niederländischer Kläranlagen modelliert. Die in diesem Prozess erzeugte Wärme und Elektrizität wird in das Modell als vermiedene Erzeugung von Wärme und Elektrizität durch konventionelle niederländische Stromerzeugung einbezogen.

Abbildung 7 - Der Lebenszyklus von Einwegwindeln mit Verbrennung



2.2.2 Einwegwindeln und Recycling

Das zweite System in dieser Studie ähnelt dem des ersten Szenarios bis zur EOL-Phase (Abbildung 8). ³Das Recyclingmodell basiert auf früheren Untersuchungen von CE Delft (2018a) und wird hier zusammengefasst. Das Recycling von Einwegwindeln/Inkontinenzmaterialien umfasst die Sammlung des getrennten Abfalls und den anschließenden Transport zum Recyclingstandort. Das Windelmaterial wird in einer TDH-Anlage unter hohem Druck und hoher Temperatur zu zwei Ausgangsströmen verarbeitet:

- Ein Schlamm, der organisches Material enthält, das anschließend zu einer Kläranlage transportiert und dort vergoren wird. Während der Vergärung wird das organische Material in Biogas umgewandelt. Der Fermenter ist verbunden mit

³ Zum Zeitpunkt dieser Studie war die TDH-Anlage noch nicht vollständig in Betrieb. In einer Folgestudie (SGS) wurde das Modell bis auf wenige Details unverändert gelassen (siehe Anhang 0). Diese haben einen geringen Einfluss auf die Umweltauswirkungen des Recyclingprozesses, weshalb wir das ursprüngliche Modell von CE

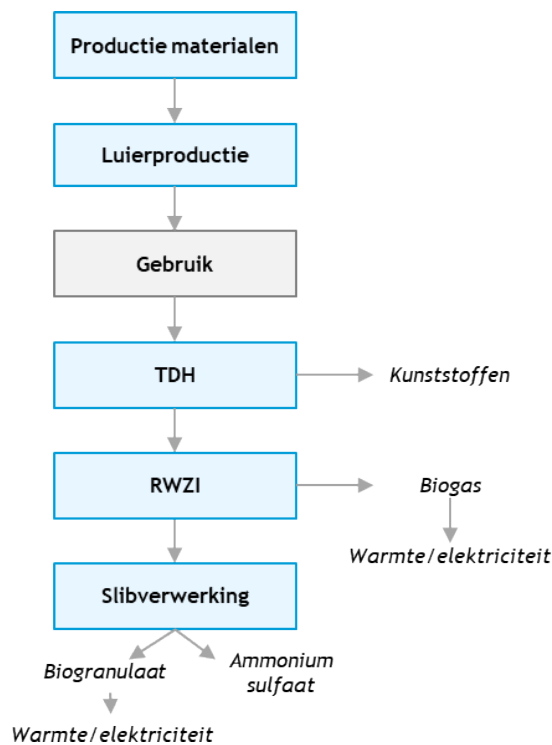
Delft beibehalten haben.



zu einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK), die das Biogas in Strom und Wärme umwandelt. Die Wärme wird für die Vergärung genutzt. Die dadurch vermiedene Erzeugung von konventionellem Strom wird in das Modell einbezogen.

- Der ausgefaulte Schlamm wird dann zu Biogranulat verarbeitet, aus dem ebenfalls Ammoniumsulfat gewonnen wird. Das Biogranulat wird ebenfalls in einer Verbrennungsanlage verbrannt, wobei Strom und Wärme erzeugt werden. Diese werden ebenfalls so modelliert, dass eine konventionelle Stromerzeugung vermieden wird. Das Ammoniumsulfat wird so modelliert, dass die Produktion von Düngemitteln vermieden wird.
- Eine Masse aus gemischten Kunststoffen. Die Kunststoffe werden granuliert und können zu neuen Produkten verarbeitet werden. Die Vorleistungen für die Verarbeitung zu neuem Kunststoffgranulat werden in das Modell einbezogen, ebenso wie die vermiedene Produktion von Neuware.

Abbildung 8 - Der Lebenszyklus von Einwegwindeln mit Recycling



2.2.3 Waschbare Windeln

Abbildung 9 zeigt die Systemgrenzen der Ökobilanz für die waschbare Windel. Wir betrachten eine waschbare (all-in-one) Windel aus 130 Gramm einer Mischung aus Kunststoff (50% Polyester), Bambusviskose (25%) und Baumwolle (25%). Dies basiert auf einer größeren waschbaren Windel für Babys von sechs Monaten bis zum Töpfchenttraining (6-15 kg). Das Gewicht ist relativ hoch, um die Umweltauswirkungen der Herstellung waschbarer Windeln nicht zu unterschätzen.

Es gibt waschbare All-in-One-Windeln, die fast die gesamte Zeit bis zum Töpfchenttraining verwendet werden können (z. B. für 3-16 kg, Tabelle 15). Der Einfachheit halber gehen wir hier davon aus, dass von der Geburt bis zum Töpfchenttraining eine größere Windelart verwendet wird.

Es gibt eine große Vielfalt an waschbaren Windeln und keine Informationen darüber, welche Materialtypen am häufigsten verwendet werden. Die hier verwendete Zusammensetzung basiert daher auf einer Stichprobe von verfügbaren All-in-One-Windeln (Anhang Tabelle 15). Es gibt auch andere Modelle waschbarer Windeln, bei denen nicht bei jedem Windelwechsel die gesamte Windel gewaschen wird, z. B. durch Verwendung separater Außenhosen und "Booster" (Stoffeinlagen für zusätzliche Saugfähigkeit). Eine All-in-One-Windel ist daher ein konservativerer Ansatz für eine waschbare Windel.

Die Herstellung der Materialien (Kunststoff, Bambusviskose und Baumwolle) ist in dem Modell enthalten. Die Umwandlung dieser Materialien in eine waschbare Windel wird nicht berücksichtigt, da keine Daten verfügbar sind. Die Auswirkungen der Produktionsphase (Materialien und Verarbeitung) sind jedoch gering, da die Windeln oft wiederverwendet werden können (450 Mal, siehe Abschnitt 2.3).

Wir gehen ferner davon aus, dass Papierbeilagen verwendet werden. Diese werden durchschnittlich 2,6 Mal verwendet (Buttie Boutique, 2022). Auch hier ist die Produktion der Materialien enthalten.

Wie bei den Einwegwindeln wird der Transport von der Produktion zum Verbraucher nicht in die Analyse einbezogen.⁴ Dies ist vermutlich ein konservativerer Ansatz für waschbare Windeln; da sie viel häufiger verwendet werden, ist weniger Transport erforderlich als bei Einwegwindeln.

Nach dem Gebrauch werden die Windeln gewaschen. Beim Waschverhalten gehen wir von einem Basisszenario aus. Dies wird in Abschnitt 2.2.3 erläutert. Weitere Szenarien für das Verbraucherverhalten bei waschbaren Windeln werden in den Ergebnissen in Abschnitt 3.4 betrachtet.

⁵Fäkalien und Urin landen im Abwasser, das nach dem Transport durch das Kanalsystem in einer Kläranlage zu Biogas verarbeitet wird. Die dadurch vermiedene konventionelle Erzeugung von Wärme und Strom wird in das Modell einbezogen.

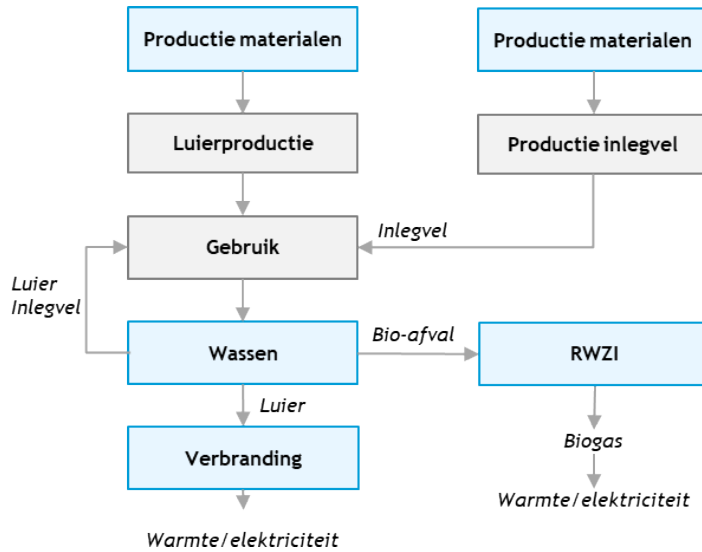
In der EOL-Phase werden die Windeln zu einer Verbrennungsanlage transportiert und dort verbrannt, wobei Emissionen entstehen und Wärme und Strom erzeugt werden. Auch hier wird die Vermeidung der konventionellen Wärme- und Stromerzeugung in das Modell einbezogen. Diese Phase spielt auch bei waschbaren Windeln eine geringe Rolle, da sich die Umweltauswirkungen der Verbrennung auf die 450 Wiederverwendungen verteilen.

⁴ Dies kann sich ändern, wenn das Waschen nicht von den Haushalten selbst, sondern an einem zentralen Ort durchgeführt wird. Diese Möglichkeit wurde hier nicht weiter untersucht.

⁵ Dies geschieht nicht in jeder Kläranlage, aber in Analogie zum einmaligen Windelrecycling beziehen wir es in das Modell ein. Der endgültige Effekt ist jedoch nicht groß. Die Menge des erzeugten Biogases basiert auf dem durchschnittlichen niederländischen Fermenter (siehe Anhang A.2.4).



Abbildung 9 - Lebenszyklus von waschbaren Windeln



2.3 Datenerhebung und Modellierung

In den folgenden Abschnitten stellen wir die Kerndaten der drei Systeme vor (Abschnitt 2.3.1) und diskutieren dann die verschiedenen Waschszenarien für waschbare Windeln (Abschnitt 2.3.2).

Die wichtigsten Quellen für die Zusammensetzung und Produktion von Einwegwindeln sind frühere Studien im Auftrag von Rijkswaterstaat (RIVM, 2016, Tauw, 2021). Die EOL-Phase von Einwegwindeln wurde anhand früherer Studien von CE Delft (2018a) und SGS Search (2021) modelliert. Über den Industrieverband EDANA haben wir Windelhersteller um eine aktualisierte Zusammensetzung von Einwegwindeln gebeten, die jedoch keine neueren Informationen lieferte. Die Modellierung der waschbaren Windeltypen und des Waschverhaltens der Verbraucher basiert auf Interviews mit der Washable Nappy World (Kliphuis, 2022). Schließlich wurde die Ecoinvent-Datenbank verwendet (Ecoinvent, 2021).

Das Modell wurde mit der LCA-Software SimaPro, Version 9.4, erstellt. Zur Berechnung der Ergebnisse wurde die Methode ReCiPe 2016 (H/A), Version 1.07, verwendet. Langfristige Emissionen sind ausgeschlossen.

2.3.1 Übersicht über die wichtigsten Daten

Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Lebenszyklus der drei untersuchten Systeme und die wichtigsten Parameter für das Modell. Wir berechnen die Umweltauswirkungen eines Wechsels für waschbare Windeln, indem wir die Produktion und das Ende des Lebenszyklus durch die Anzahl der Wiederverwendungen teilen. Zum Beispiel berechnen wir für die Produktion einer waschbaren Windel pro Wechsel ein Gewicht von 130 g geteilt durch 450 Wiederverwendungen, was 0,3 g Windel ergibt. Die detaillierte Modellierung der einzelnen Windelsysteme wird in Anhang A näher beschrieben.

Tabelle 1 - Modell der verschiedenen Stufen des Lebenszyklus von Einwegwindeln (verbrannt und recycelt) und waschbaren Windeln, die in dieser Studie verwendet wurden

	Einmalige Windeln und Verbrennung	Einmalige Windeln und Recycling	Waschbare Windeln
Produktion			
Art des Produkts	Marktdurchschnitt nach TAUW 2021	Marktdurchschnitt nach TAUW 2021	All-in-One-Windel für die Geburt bis zum Töpfchentraining
Gewicht (1 Windel)	33,3 g	33,3 g	130 g ^a (für 1 Wechsel 0,3 g)
Zusammensetzung	27% Zellstoff 38% APS 29% Kunststoff 7% Klebstoff, elastisch, andere	27% Zellstoff 38% APS 29% Kunststoff 7% Klebstoff, elastisch, andere	25% Baumwolle 50% Kunststoff 25% Bambus
Produktion	52,8 kWh Strom 20 kJ Wärme 2 g Wasser	52,8 kWh Strom 20 kJ Wärme 2 g Wasser	Nicht enthalten
Verwenden Sie			
Anzahl der Verwendungen	1	1	450 ^c (Für 1 Änderung, 1 Mal verwenden)
Wiederverwendung	K.A.	K.A.	Verwendung in Waschmaschine und Trockner: siehe Abschnitt 2.3.2. Verwendung mit Papiereinlage, die 2,6 Mal wiederverwendet wird. (0,4 Einsatz/Differenz)
Erleichterung pro Änderung	103,2 g Urin 22,8 g Fäkalien	103,2 g Urin 22,8 g Fäkalien	103,2 g Urin 22,8 g Fäkalien
Nettoenergiegewinnung aus Klärschlamm	K.A.	K.A.	Elektrizität: 0,6 Wh/Schicht Wärme: 3,1 kJ/Schicht
Ende des Lebens			
Methode der Verarbeitung	Verbrennung mit Energierückgewinnung	Recycling (thermisch Druckhydrolyse)	^e Verbrennung mit Energierückgewinnung (geteilt durch 450 für 1 Änderung)
Transportentfernung	80 km	80 km	80 km
Koppelprodukte	Elektrizität: 0,04 kWh/Windel Wärme: 0,19 MJ/Windel	Gemischter Kunststoff: 16,6 g/Windel Elektrizität (aus Biogas): 5,88 Wh	Stromverbrauch: 0,11 kWh/Windel Wärme: 0,48 MJ/Windel (geteilt durch 450 für 1 Änderung)

- a In einer neueren Studie von True Price (2022) wurden ebenfalls verbrannte Einwegwindeln mit waschbaren Windeln verglichen. In dieser Studie wurden ähnliche Daten wie hier verwendet. True Price verwendet jedoch ein höheres Gewicht für die Mehrwegwindeln (160-230 g). Dies wirkt sich nur geringfügig auf die Ergebnisse aus, da der größte Teil der Auswirkungen in der Nutzungsphase entsteht.
- b Die waschbare Windel wird als 130 g schwerer gewebter Stoff modelliert. Die Herstellung (Nähen usw.) der



Windel wird nicht berücksichtigt, da dies im Vergleich zu den Auswirkungen der Rohstoffe und des Waschens vernachlässigbar ist.

- c Angeblich werden 24 waschbare Windeln verwendet, um zwei Kinder auf das Töpfchen zu bringen. Mit 5.400 Windelwechsel pro Kind von der Geburt bis zum Töpfchentraining ergeben $5.400 \cdot 2$ Windelwechsel/24 Windeln = 450 Windelwechsel pro Windel. Ein geringeres Recycling pro Windel wird in Abschnitt 3.4.4 untersucht.



- d Die Strom- und Wärmeerzeugung in der Verbrennungsanlage und das Kunststoffrecycling werden als vermiedene Strom-/Wärmeerzeugung und Produktion von Neuplastik berücksichtigt.
- e Wir befassen uns nicht mit dem Recycling, da die hohe Wiederverwendungsrate bedeutet, dass die Auswirkungen der EOL-Phase gering sind.
- f Pro Tonne Windelabfall werden 104 kg Kunststoff recycelt. Eine volle Windel wiegt 159,3 g. $104 \text{ kg} / 1.000 \text{ kg} * 153,9 \text{ g/Windel} = 16,6 \text{ g Kunststoff pro Windel}$.

2.3.2 Basisszenario waschbare Windel

Das **Basisszenario für waschbare Windeln** basiert auf Daten und Annahmen über das typische Waschverhalten der niederländischen Haushalte. Die folgenden Annahmen wurden verwendet:

- **Anzahl der Screenings:** In den ersten 3,2 Jahren finden 5.400 Wechsel statt (Tauw, 2021). Ein Kind wird also durchschnittlich 4,6 Mal pro Tag gewickelt.
- **Waschhäufigkeit:** Die Windeln werden dreimal pro Woche gewaschen (Vorwäsche und Hauptwäsche). Im Durchschnitt werden also $(4,6 \text{ Windeln pro Tag} * 7/3 =) 10,7 \text{ Windeln pro Waschgang}$ gewaschen. Wenn mit dem Waschen länger gewartet wird (d. h. länger als drei Tage), werden die Windeln nicht richtig sauber.
- **Vorwäsche:** Die Windeln werden kalt vorgewaschen, damit die Verunreinigungen nicht in andere Kleidungsstücke und Haushaltsgeräte gelangen. Die Vorwäsche besteht aus 100 % Windeln.
- **Hauptwaschgang:** Im Hauptwaschgang werden die Windeln zusammen mit anderer Wäsche gewaschen. 40 Grad. Wir gehen davon aus, dass 35 % der Hauptwäsche aus Windeln besteht. Dies wird wie folgt ermittelt:
 - Durchschnittliches Fassungsvermögen der Waschmaschine: 8 kg.
 - Beladungsgrad: 50 %. Dies ist eine konservative Schätzung, da eine Umfrage der Verbrauchervereinigung zeigt, dass die meisten Menschen die Maschine füllen, bis nur noch eine Handvoll Platz übrig ist, oder sobald der Wäschekorb voll ist. (Verbraucherverband, 2018)
 - Windelgewicht: 1,4 kg pro Wäsche. ⁶Bei 4,6 Windeln von 130 Gramm pro Tag und drei Wäschen pro Woche beträgt das Windelgewicht pro Waschgang $(10,7 \text{ Windeln pro Waschgang} * 130 \text{ Gramm/Windel} =) 1,4 \text{ kg}$.
 - Bei einer durchschnittlichen Wäsche sind also $(1,4 / (8 * 50\%) =) 35\%$ der Wäsche besteht aus Windeln. Ein Wechsel macht also $(35 \% / 10,7 \text{ Windeln pro Wäsche} =) 3,2 \%$ der Umweltauswirkungen einer Hauptwäsche aus.
 - Das Waschen der Einlage ist nicht inbegriffen, da es vernachlässigbar ist (0,014 kg für zehn Einlagen bei einer 8-kg-Wäsche).
- **Trockner:** Windeln werden zusammen mit anderer Wäsche auf der Einstellung "Baumwolle schranktrocken" getrocknet.
 - Die durchschnittliche Kapazität, der Beladungsgrad und das Gewicht der Windeln sind die gleichen wie bei der Hauptwäsche.
 - Anteil der getrockneten Wäsche: Wir gehen davon aus, dass die Hälfte der Windeln in der Maschine und die Hälfte auf der Wäscheleine getrocknet wird. Damit macht die Auswirkung des Trocknens eines Wechsels $(3,2\% * 50\% =) 1,6\%$ der Umweltauswirkungen des Trocknungsprogramms aus.
- **Waschmittel:** Pro Hauptwäsche werden durchschnittlich 50 g Waschmittel verbraucht. Wie beim Energie- und Wasserverbrauch für die Hauptwäsche entfallen 35 % davon auf die Windeln in der Wäsche. In der Vorwäsche wird kein Waschmittel verwendet.

Das Basisszenario ist nicht repräsentativ für alle Haushalte. Außerdem ist eine große Variation der Parameter möglich. In einer Sensitivitätsanalyse wurde daher jeder Parameter einzeln variiert und seine Auswirkungen auf die Umweltauswirkungen analysiert (Anhang B).



⁶ Wir gehen hier vom Trockengewicht der waschbaren Windel aus, da die Kapazität von Waschmaschinen vermutlich auch auf Trockenwäsche basiert. Gebrauchte waschbare Windeln sind zwar schwerer als 130 g, aber Fäkalien landen wegen der Verwendung von Einlagen grundsätzlich nicht in der Waschmaschine, und Urin ist ähnlich wie das Wasser, das die Waschmaschine selbst liefert.



Für die Parameter, die einen großen Einfluss auf die endgültigen Umweltauswirkungen haben, fügen wir den Ergebnissen zusätzliche Szenarien hinzu, z. B. eine Kombination von Parametern, die zu sehr hohen oder niedrigen Auswirkungen führen (siehe Abschnitt 3.3). Darüber hinaus ermitteln wir die Umweltauswirkungen einer Reihe von praktischen Entscheidungen, die Haushalte bei der Verwendung waschbarer Windeln treffen können (siehe Abschnitt 3.4).

Tabelle 2 zeigt, wie sich aus den Annahmen des Basisfalls der Strom-, Wasser- und Waschmittelverbrauch pro Wechsel ergibt. Der Strom- und Wasserverbrauch verschiedener Wasch- und Trockenprogramme wurde anhand einer Stichprobe von Waschmaschinen und Trocknern ermittelt, die derzeit auf dem niederländischen Markt erhältlich sind (Coolblue, 2022) (weitere Informationen in Kasten 1). Für den Stromverbrauch wurde der durchschnittliche niederländische Strommix verwendet.

Tabelle 2 - Basisszenario Waschen und Trocknen

Abschnitt	Verbrauch pro Änderung	Kommentare
Vorwaschen	Elektrizität: 12 Wh/Schicht Wasser: 4,2 l/Schicht	^{aa} Strom: 0,13 kWh/Waschgang im Kalt-Kurz-Programm Wasser: 45 l/Waschgang. 10,7 Wechsel pro Waschgang.
Hauptwäsche	Elektrizität: 23 Wh/Schicht Wasser: 2,0 l/Schicht	^a Stromverbrauch: 0,72 kWh/Waschgang bei 40 Grad. ^a Wasser: 62 l/Waschgang. Davon entfallen 35 % auf die 10,7 Windeln, die gleichzeitig gewaschen werden.
Waschmittel	Waschpulver: 1,6 g/Shampoo	50 g Waschmittel/Waschgang. Davon entfallen 35 % auf die 10,7 Windeln, die auf einmal gewaschen werden.
Trocknen	Stromverbrauch: 36 Wh/Schicht	^a Stromverbrauch: 2,2 kWh/Waschgang beim Trocknungsprogramm für Baumwollschränke. Davon entfallen 35 % auf die 10,7 Windeln, die auf einmal getrocknet werden. Dieser Wert halbiert sich, wenn man davon ausgeht, dass die Hälfte der Windeln auf dem Band getrocknet.

^{a)} Durchschnittlicher Strom- und Wasserverbrauch von Waschmaschine und Trockner, siehe Anhang A.2.3.



Kasten 1 - Stromverbrauch Waschmaschinen

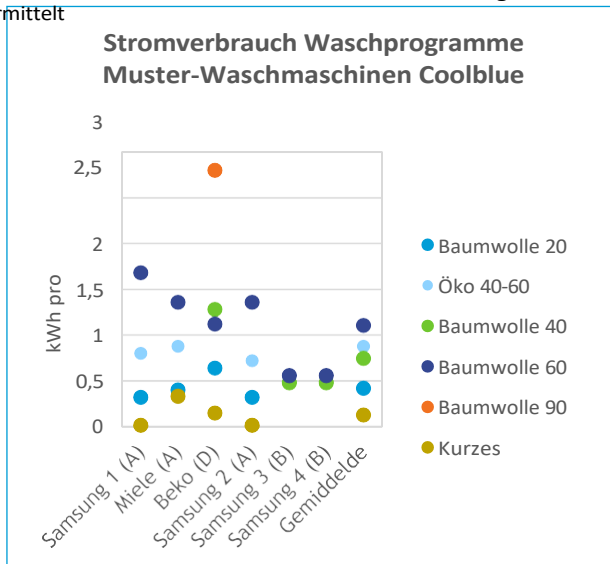
Zur Schätzung des Energieverbrauchs eines Waschprogramms
Waschprogramme einer Programmstichprobe **erhältlich sind. Hinter den Klammern angegeben** sechs Waschmaschinen, die derzeit über die Marke ist das Energielabel in Coolblue in den Niederlanden verfügbar (Coolblue, 2022). Der durchschnittliche Verbrauch wurde ermittelt
 Berechnung der Auswirkungen des Windelwaschens.

Zwei Dinge fallen jedoch auf: 1) die Streuung des Mittelwerts ist sehr groß, und 2) Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Energielabel und dem Stromverbrauch der meisten Waschprogramme. Letzteres liegt daran, dass sich das Energielabel auf das Waschprogramm Eco 40-60 bezieht und somit nichts über den Verbrauch eines Waschprogramms Cotton 40 oder 60 aussagt. Da Windeln nicht mit dem Waschprogramm Eco 40-60 gewaschen werden (in unserer Stichprobe wird bei 25-31°C gewaschen), halten wir das Energielabel für diese Studie nicht für relevant.

Ein Teil der Haushalte verwendet jedoch eine Waschmaschine mit Unter- oder

Abbildung 10 - Stromverbrauch der

Waschmaschinen, die derzeit in den Niederlanden
 Diese Zahl basiert auf Daten aus Anhang A.2.3.



3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt diskutieren wir zunächst die Ergebnisse für einen Windelwechsel für verschiedene Umweltauswirkungen (Mittelwerte) und Schadenskategorien (Endpunkte) in Abschnitt 3.1.

Ziel ist es zu ermitteln, welches Windelsystem die geringsten Umweltauswirkungen hat, wenn wir möglichst viele Umweltauswirkungen berechnen.

Ab Abschnitt 3.2 konzentrieren wir uns weiter auf die Klimaauswirkungen bzw. den Beitrag zum Klimawandel durch Treibhausgasemissionen. Die Klimaauswirkungen werden durch die Politik vermittelt und gelten gesellschaftlich als eine der wichtigsten Umweltauswirkungen.⁷ Bei Produktsystemen, die fossile Energie verwenden (z. B. für die Herstellung von Kunststoffen oder Strom), korreliert die Klimawirkung zudem stark mit der gesamten Umweltbelastung.

In Abschnitt 3.2 erörtern wir die Klimaauswirkungen einer einzelnen Änderung, und in Abschnitt 3.3 betrachten wir die Klimaauswirkungen aller Änderungen während der gesamten Windelperiode eines Kindes. In Abschnitt 3.4 erläutern wir die Faktoren, die zu den Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln beitragen, und zeigen die Klimaauswirkungen von vier praktischen Situationen auf. Schließlich betrachten wir in Abschnitt 3.5 die Auswirkungen des verwendeten Strommixes auf die Klimawirkung von Windeln.

3.1 Ergebnisse Umweltindikatoren (pro Veränderung)

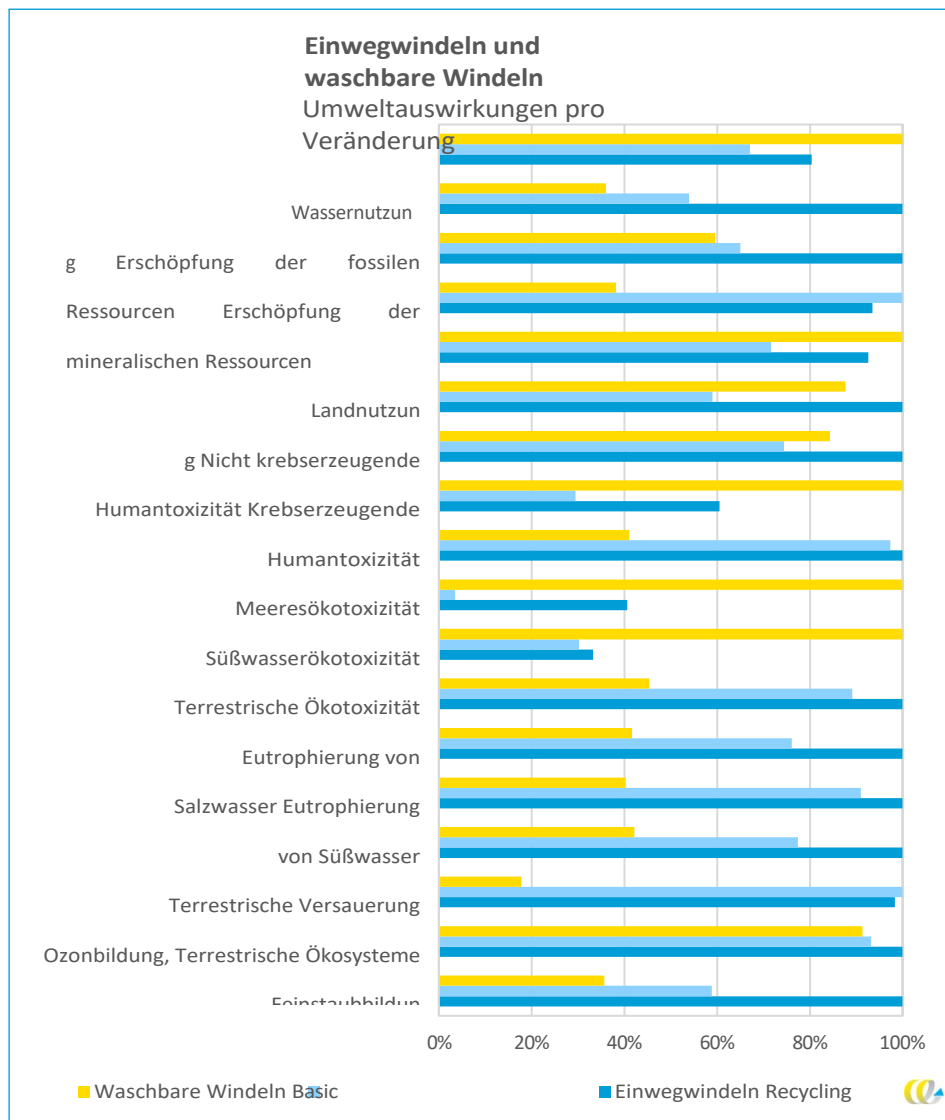
3.1.1 Mittelpunkte

Die ReCiPe 2016-Methode berechnet die Ergebnisse für 18 Umweltauswirkungen, einschließlich der Klimaauswirkungen. Dies sind die Midpoint-Indikatoren. Die Ergebnisse für alle Umweltindikatoren sind in Abbildung 11 dargestellt, wobei das Windelsystem mit den höchsten Umweltauswirkungen auf 100 % gesetzt wurde. Tabelle 3 zeigt die gleichen Ergebnisse.

⁷ In Anhang C wird der Beitrag der verschiedenen Umweltauswirkungen in einem übergreifenden (nicht ISO-konformen) Single-Score-Indikator betrachtet, der die gesamten Umweltauswirkungen widerspiegelt.



Abbildung 11 - Umweltauswirkungen von Einwegwindeln und waschbaren Windeln auf mittlerer Ebene. (Die höchste Auswirkung für jeden Umwelteffekt ist auf 100% gesetzt)



Im Basisfall hat die waschbare Windel für die meisten Wirkungskategorien geringere Auswirkungen als Einwegwindeln. Bei der Eutrophierung von Süß- und Salzwasser haben waschbare Windeln eine 3 bzw. 2,5 Mal höhere Auswirkung als Einwegwindeln mit Verbrennung. Bei der Süßwasserökotoxizität haben waschbare Windeln ebenfalls eine 65 % höhere Auswirkung. Bei diesen Kategorien ist der höhere Wert der waschbaren Windeln in erster Linie auf die Abwasserbehandlung beim Waschen zurückzuführen (40-70 % der Auswirkungen). Die Produktion der Baumwolle für die Windel, die Einlage und das Waschmittel machen den Rest der Auswirkungen in diesen Kategorien aus.

Beim Wasserverbrauch hat die waschbare Windel im Basisszenario aufgrund des Waschens eine um 24 % höhere Wirkung. Im Szenario mit geringen Auswirkungen wird der Unterschied zur Einwegwindel sehr gering.



Die LAP3-Methode kann zur weiteren Interpretation dieser Ergebnisse herangezogen werden (RWS, 2021). Nach der LAP3-Methode ist eine Technologie ökologisch besser, wenn sie in allen Mittelwertkategorien einen niedrigeren Wert aufweist (ein niedrigerer Wert bedeutet eine geringere Umweltbelastung und ist daher besser). Wenn dies nicht der Fall ist, sollten einige spezifische Mittelwertkategorien berücksichtigt werden⁸. In diesem Fall ist eine Technologie höherwertig, wenn sie bei all diesen Mittelwertkategorien einen niedrigeren Wert aufweist. Diese Situation trifft hier nicht zu (z. B. aufgrund des Ergebnisses zur Süßwasserökotoxizität; Abbildung 11). In diesem Fall schreibt der LAP3 die Betrachtung der so genannten Endpunkt-Ergebnisse vor, die wir im nächsten Abschnitt diskutieren.

Tabelle 3 - Umweltauswirkungen von Wegwerfwindeln und waschbaren Windeln, pro Wechsel. Die Szenarien für die waschbaren

Windel sind die gleichen wie in Abschnitt 3.2

Kategorie "Auswirkungen"	Einheit	Einmalig Windeln, Verbrennungen	Einmalig Windeln, Recycling	Waschbare Windeln, Basisfall
Der Klimawandel	kg CO ₂ -eq.	0,14	0,08	0,05
Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre	kg CFC11-Äq.	5,0E-08	4,7E-08	4,6E-08
Ionisierende Strahlung	kBq Co-60 Äq.	1,5E-03	1,6E-03	2,8E-04
Ozonbildung, menschliche Gesundheit	kg NO _x -eq.	2,2E-04	1,7E-04	9,2E-05
Feinstaubbildung	kg PM _{2.5} -eq.	1,3E-04	1,2E-04	5,4E-05
Ozonbildung, Terrestrische Ökosysteme	kg NO _x -eq.	2,3E-04	1,7E-04	9,4E-05
Terrestrische Versauerung	kg SO ₂ -eq.	3,1E-04	2,8E-04	1,4E-04
Eutrophierung von Süßwasser	kg P-Äq.	1,1E-05	9,7E-06	3,2E-05
Eutrophierung von Salzwasser	kg N-Äq.	2,0E-05	1,7E-06	5,0E-05
Terrestrische Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	0,21	0,21	0,09
Süßwasser-Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	1,2E-04	5,7E-05	1,9E-04
Marine Ökotoxizität	kg 1,4-DCB	2,7E-04	2,0E-04	2,3E-04
Karzinogene Toxizität für den Menschen	kg 1,4-DCB	1,3E-03	7,5E-04	1,1E-03
Nicht karzinogene Toxizität beim Menschen	kg 1,4-DCB	0,02	0,02	0,02
Landnutzung	² m ein Kulturpflanzen-Äquivalent.	0,02	0,02	0,01
Erschöpfung der Bodenschätze	kg Cu-Äq.	2,0E-04	1,3E-04	1,2E-04
Erschöpfung der fossilen Ressourcen	kg Öl-Äq.	0,040	0,021	0,014
Wasserverbrauch	m ³	1,6E-03	1,4E-03	2,0E-03

3.1.2 Endpunkte

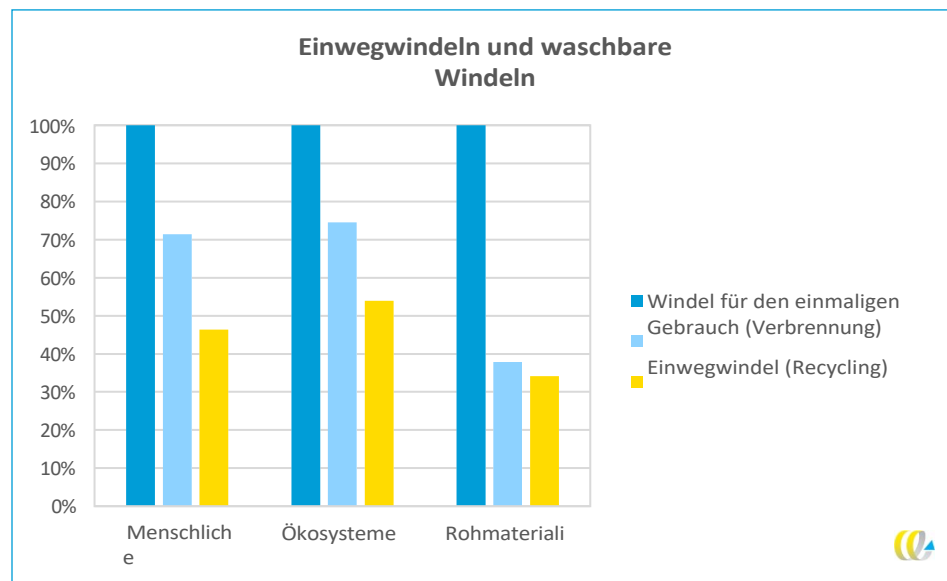
Die verschiedenen Midpoint-Indikatoren tragen zu drei übergreifenden Schadenskategorien oder "Endpunkten" bei: menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse auf Endpunktebene für die drei untersuchten Windelsysteme.



⁸ Klimawandel, Humantoxizität, Ökotoxizität, Abbau von Mineralien/Metallen und Erschöpfung fossiler Ressourcen.



Abbildung 12 - Umweltauswirkungen von Einwegwindeln und waschbaren Windeln auf Endpunktebene. (Die höchste Auswirkung für jede Schadenskategorie ist auf 100 % gesetzt).



Die Einwegwindel mit Verbrennung schneidet durchweg am besten ab, die waschbare Windel im Basisfall am schlechtesten. Die Auswirkungen der waschbaren Windeln sind 45 % bis 65 % geringer als die der Einwegwindeln mit Verbrennung. Dies liegt daran, dass die mittleren Kategorien, in denen waschbare Windeln besser abschneiden als Einwegwindeln, im Endergebnis stärker ins Gewicht fallen als diejenigen, in denen waschbare Windeln weniger gut abschneiden.

Der LAP3 besagt, dass eine Technologie ökologisch überlegen ist, wenn sie bei allen drei Endpunktindikatoren einen niedrigeren Wert aufweist. Aus den Ergebnissen auf Endpunktebene dürfen nur dann Schlussfolgerungen gezogen werden, wenn die festgestellten Unterschiede wesentlich und signifikant sind. Darüber hinaus sollten die Unterschiede nicht wesentlich durch Unsicherheiten in den Annahmen beeinflusst werden.

Die deutlich niedrigeren Werte bei allen Endpunkten zeigen, dass waschbare Windeln eine geringere Umweltbelastung haben als Einwegwindeln. Es ist jedoch zu beachten, dass dies für das Basisszenario gilt, das nicht für alle niederländischen Haushalte repräsentativ ist.

Tabelle 4 - Endpunkt-Ergebnisse: Vergleich von Einwegwindeln mit Verbrennung oder Recycling und waschbaren Windeln (Basisfall)

Endpunkt	Einheit	Windel für den einmaligen Gebrauch (Verbrennung)	Windel für den einmaligen Gebrauch (Recycling)	Waschbare Windel (Basisfall)
Menschliche Gesundheit	DALY	2,25E-07	1,61E-07	1,04E-07
Ökosysteme	Arten.Jahr	6,65E-10	4,96E-10	3,59E-10
Rohmaterialien	USD2013	0,0118	0,0045	0,0040465

3.2 Klimaauswirkungen von Windeln pro Wechsel

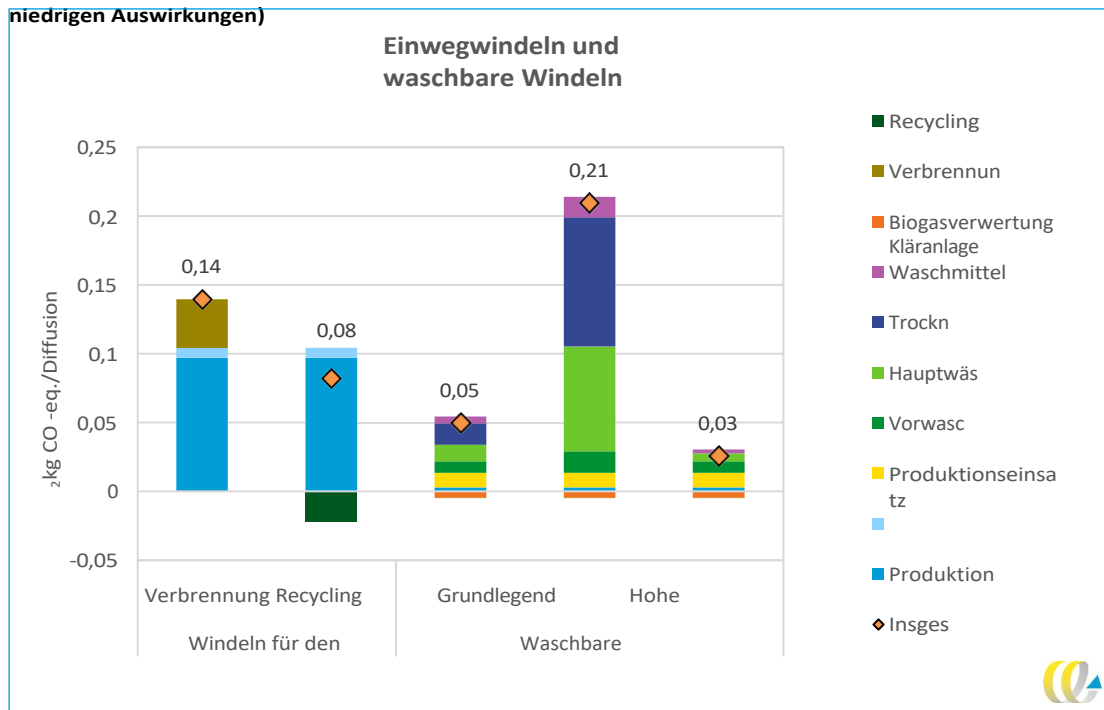
Die Ergebnisse der Klimaauswirkungen von Einwegwindeln und waschbaren Windeln sind in Abbildung 13 dargestellt. Die Einwegwindel mit Verbrennung hat mit 0,14 kg CO₂-eq. pro Wechsel die höchste Klimawirkung. Werden Einwegwindeln recycelt, sinkt die Klimawirkung um 41% auf 0,08 kg CO₂-eq./Wechsel. Im Basisfall liegt die Klimawirkung von waschbaren Windeln bei 0,05 kg CO₂-eq./Differenz, was einer Verringerung um 64% im Vergleich zu Einwegwindeln entspricht, die verbrannt werden. Dies hängt jedoch vom Waschverhalten der Haushalte ab, das weiter unten in der Abbildung erläutert wird.

Bei Einwegwindeln, die verbrannt werden, stammen 69% der Klimaauswirkungen aus den Materialien und der Produktion der Windel und 5% aus der Verpackung (Materialien und Produktion). Die restlichen 25% werden durch die Verbrennung verursacht. Dabei ist die Energierückgewinnung in der Verbrennungsanlage berücksichtigt.

Beim Recycling von Einwegwindeln sind die Klimaauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus um 41% geringer, da die Verbrennung vermieden und Kunststoffgranulat, Ammoniumsulfat, Biogas und Biogranulat erzeugt werden.

Die Klimawirkung der Produktionsphase einer waschbaren Windel ist nur ein kleiner Teil der gesamten Klimawirkung aufgrund der Wiederverwendung (450 Mal für den Basisfall), d.h. 5% für den Basisfall. Die Produktion der Einlage macht zwar einen erheblichen Teil der Gesamtauswirkungen aus (22% im Basisfall), aber die größten Klimaauswirkungen entstehen durch das Waschen der Windeln.

Abbildung 13 - Klimaauswirkungen (kg CO₂-eq./Schicht) von Einwegwindeln (mit Verbrennung oder Recycling als EOL) und waschbaren Windeln (mit dem Basiszenario Waschen und zwei Szenarien mit hohen und niedrigen Auswirkungen)



Die Klimawirkung der waschbaren Windel hängt stark vom Waschverhalten des Nutzers sowie von Waschmaschine und Trockner ab. Abbildung 13 zeigt zusätzlich zum Basisszenario zwei Szenarien mit hoher und niedriger Klimawirkung. Diese Szenarien sind nicht als absolute Best-Case- und *Worst-Case-Szenarien zu verstehen*, sondern zeigen realistische günstige und ungünstige Situationen, wie sie in niederländischen Haushalten auftreten können. ⁹Tabelle 5 zeigt, wie sich diese Szenarien vom Basisszenario unterscheiden. Orange schattierte Zellen zeigen eine höhere Klimaauswirkung pro Veränderung im Vergleich zum Basisszenario an, während grüne Zellen eine geringere Klimaauswirkung anzeigen.

Im Szenario mit hoher Auswirkung wird dies durch das separate Waschen der Windeln in einer Waschmaschine und einem Trockner mit hohem Stromverbrauch verursacht. Dies führt zu einer um 50 % *höheren* Klimabelastung im Vergleich zu einer Einwegwindel mit Verbrennung.

Im Vergleich zu einer recycelten Einwegwindel ist dies eine Steigerung von 155 %.

Das Low-Impact-Szenario basiert auf dem durchschnittlichen Stromverbrauch der Waschmaschine, der vollständigen Befüllung mit anderer Wäsche und dem Trocknen der Windeln auf der Leine. Dies führt zu einer weiteren Halbierung der Klimawirkung von waschbaren Windeln auf eine Klimawirkung von 18 % der Klimawirkung von Einwegwindeln mit Verbrennung und 31 % der Klimawirkung von recycelten Einwegwindeln.

Tabelle 5 - Zusammenfassung der Variationen im Basisszenario, im Szenario mit starker und im Szenario mit geringer Auswirkung für waschbare Windeln.

Die Klimaauswirkungen dieser Szenarien sind in Abbildung 13 dargestellt

Parameter	Grundlegend	Hohe Wirkung	Geringe Auswirkungen
Füllmenge der Waschmaschine/des Trockners	50%	18% ^a	100%
Anteil der getrockneten Wäsche (vs. Wäscheleine)	50%	50%	0%
Energieverbrauch Vorwäsche (kWh/Waschgang)	0,13	0,33	0,13
Energieverbrauch Hauptwaschgang (kWh/Waschgang)	0,72	1,67	0,72
Energieverbrauch Trockner (kWh/Waschgang)	2,20	4,63	2,20
Wasserverbrauch Waschmaschine (L/Waschgang)	107	154	107

(a) Hier werden die Windeln separat gewaschen (keine andere Wäsche hinzugefügt).

3.3 Klimaauswirkungen von Windeln pro Kind, das aufs Töpfchen geht

Die Auswirkungen einer einzigen Veränderung sind gering. Um die Ergebnisse in einen Kontext zu stellen, ermitteln wir hier die Auswirkungen auf das Klima, wenn ein Kind aufs Töpfchen geht. ¹⁰In diesem zweiten Vergleich untersuchen wir auch die Auswirkungen von zwei Faktoren, die von Kind zu Kind unterschiedlich sein können: wie schnell das Kind aufs Töpfchen geht und wie oft die Windel gewechselt wird.

Für alle drei betrachteten Systeme (verbrannte Einwegwindeln, recycelte Einwegwindeln, waschbare Windeln) betrachten wir Variationen in der Gesamtzahl der Wechsel pro Kind, das aufs Töpfchen geht. Wir variieren die Zeit bis zum Töpfchentraining zwischen dem Durchschnitt von 3,2 Jahren (TAUW, 2021) und einem kürzeren Zeitraum von 2,5 Jahren. Die Anzahl der Wechsel

- ⁹ In diesen Szenarien werden nur die Faktoren berücksichtigt, die sich am stärksten auf die Gesamtklimaauswirkungen. Diese Hauptfaktoren wurden in der Analyse in Anhang B ermittelt.
- ¹⁰ Da diese Fragen von Kind zu Kind unterschiedlich sind, sind die Ergebnisse dieses Vergleichs auch weniger sicher. Obwohl in der Literatur kein Unterschied in der Zeit bis zum Töpfchentraining für Wegwerfwindeln oder waschbare Windeln berichtet wird (Environment Agency, 2008), ist es wichtig zu sehen, wie sich die unterschiedliche Länge der Windelperioden auf das Gesamtklima auswirkt. Auch die Anzahl der Windelwechsel pro Tag hängt vom Kind und den Entscheidungen der Eltern ab.



Wie in Tabelle 6 dargestellt, ergeben sich daraus drei Varianten von 4.200, 5.400 bzw. 7.000 Windeln pro Kind, das aufs Töpfchen geht. Für waschbare Windeln wird hier das Basisszenario angenommen.

Tabelle 6 - Variationen bei der Gesamtzahl der Windelwechsel, die während der gesamten Windelperiode eines Kindes erforderlich sind. Die Gesamtzahl der Windelwechsel hängt von der Zeit ab, bis das Kind aufs Töpfchen geht, und von der durchschnittlichen Anzahl der Windelwechsel pro Tag

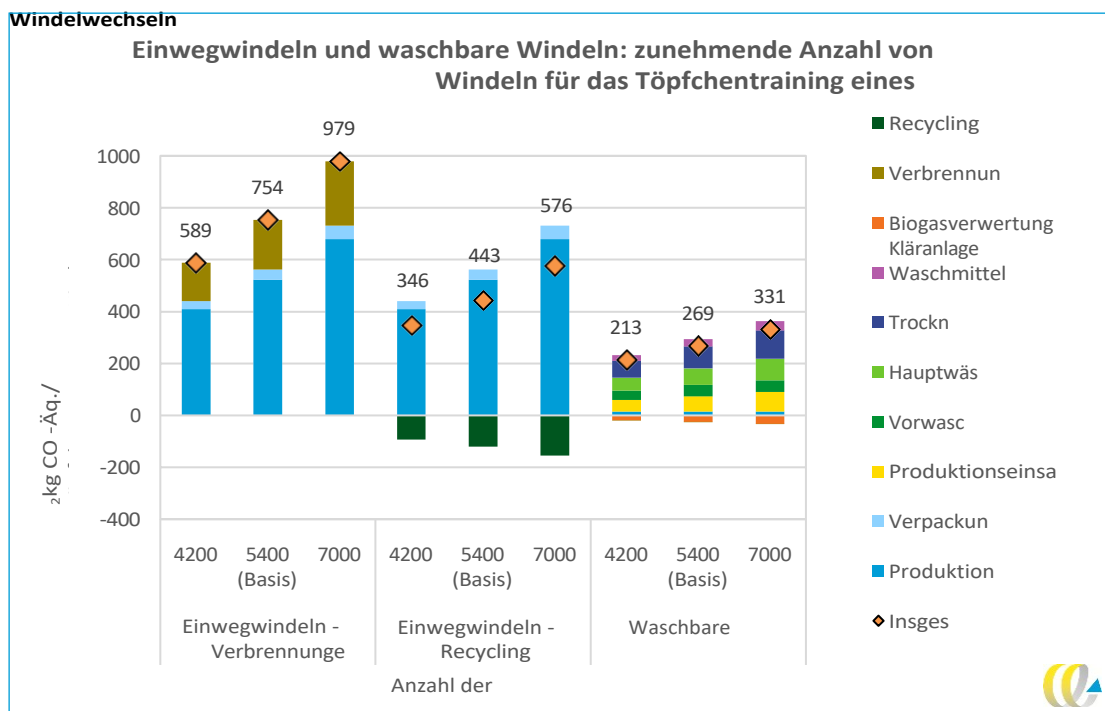
	Zeit bis zum Töpfchentraining (Jahre)	Änderungen pro Tag	Gesamtzahl der Änderungen
Variante 1	2,5	4,6	4.200
Variante 2	3,2	4,6	5.400
Variante 3	3,2	6,0	7.000

Abbildung 14 zeigt die Klimaauswirkungen für die gesamte Windelperiode. Zur Berechnung dieser Auswirkung multiplizieren wir die Auswirkung eines Wechsels mit der Gesamtzahl der Wechsel, die nötig sind, um ein Kind aufs Töpfchen zu bringen. Die drei untersuchten Varianten haben eine Klimawirkung von 589, 754 und 979 kg CO₂-eq bei der Verwendung von Einwegwindeln mit Verbrennung. Bei der Verwendung von Einwegwindeln mit Recycling liegt die Klimawirkung der drei Varianten bei 346, 443 und 576 kg CO₂-eq. Bei der Verwendung von Einwegwindeln (Verbrennung oder Recycling) führt Variante 1 (4.200 Windeln) zu einer Reduzierung um 22 % im Vergleich zum Basisszenario (5.400 Windeln). Variante 3 (7.000 Windeln) führt zu einem Anstieg von 30 % im Vergleich zum Basisszenario.

Die Verwendung waschbarer Windeln führt zu einer Klimawirkung von 213, 269 und 331 kg CO₂-eq für die drei Varianten. Variante 1 (4.200 Wechsel) hat eine um 21 % geringere Klimawirkung als das Basisszenario mit 5.400 Wechseln. Die waschbare Windel Variante 3 mit 7.000 Wechseln hat eine 23% höhere Klimawirkung als das Basisszenario mit 5.400 Änderungen. Der prozentual geringere Anstieg der Klimabelastung bei waschbaren Windeln im Vergleich zu Einwegwindeln (23 % gegenüber 30 % bei Einwegwindeln) ist darauf zurückzuführen, dass bei waschbaren Windeln die Klimabelastung durch die Produktion und die End-of-Life-Phase mit zunehmender Anzahl der Wechsel konstant bleibt. Nur die Anzahl der Wasch- und Trocknungsvorgänge steigt mit zunehmender Gesamtzahl der Wechsel.



Abbildung 14 - Klimaauswirkungen (kg CO₂-Äq.) von Wegwerfwindeln (mit Verbrennung oder Recycling als EOL) und waschbaren Windeln für die gesamte Windelperiode eines Kindes, bei 4.200, 5.400 oder 7.000



3.4 Waschbare Windeln: Unterschiede im Verbraucherverhalten

Die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln hängen von verschiedenen Faktoren ab. 2Oben wurden zwei theoretische Szenarien mit geringen und hohen Auswirkungen verglichen, bei denen die Auswirkungen zwischen 0,03 und 0,21 kg CO₂-eq. pro Wechsel liegen. In der Praxis haben die Windelnutzer nicht immer die Kontrolle über alle Faktoren, die zu den Klimaauswirkungen beitragen. Um einen Einblick in die Faktoren zu geben, die sie beeinflussen können, wird die Klimawirkung hier für eine Reihe konkreter Situationen berechnet, in denen die Entscheidungen der Verbraucher eine wichtige Rolle für die Umweltauswirkungen spielen.

3.4.1 Situation 1: keine Sparwaschmaschine und kein Trockner

In dieser Fallstudie untersuchen wir die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln in Haushalten mit ineffizienten Geräten. Dabei betrachten wir zwei Fälle: einen, bei dem die Waschmaschine (Baumwollprogramm 40°C) und der Trockner ineffizient sind und der Rest des Basisszenarios unverändert bleibt, und einen, bei dem der Haushalt die Geräte vollständig befüllt, um Energie zu sparen. 2Die für diese Szenarien verwendeten Parameter sind in Tabelle 8 und die Klimaauswirkungen in Abbildung 15 dargestellt. Die Verwendung einer halb gefüllten, ineffizienten Waschmaschine und eines ineffizienten Trockners hat eine Klimaauswirkung von 0,08 kg CO₂-eq. pro Wechsel. 2Wenn dieselbe Waschmaschine und derselbe Trockner voll befüllt sind, sinkt die Klimawirkung um 35 % auf 0,05 kg CO₂-eq. pro Wechsel.

Wenn das ineffiziente 40°C-Baumwollprogramm gegen ein durchschnittliches 60°C-Baumwollprogramm ausgetauscht wird, bleiben die Klimaauswirkungen gleich. Tatsächlich verbraucht ein durchschnittliches 60°C-Baumwollprogramm genauso viel Strom wie das



40°C-Baumwollprogramm mit dem höchsten Verbrauch in unserer Stichprobe. Der Wasserverbrauch eines ineffizienten 40°C-Baumwollprogramms



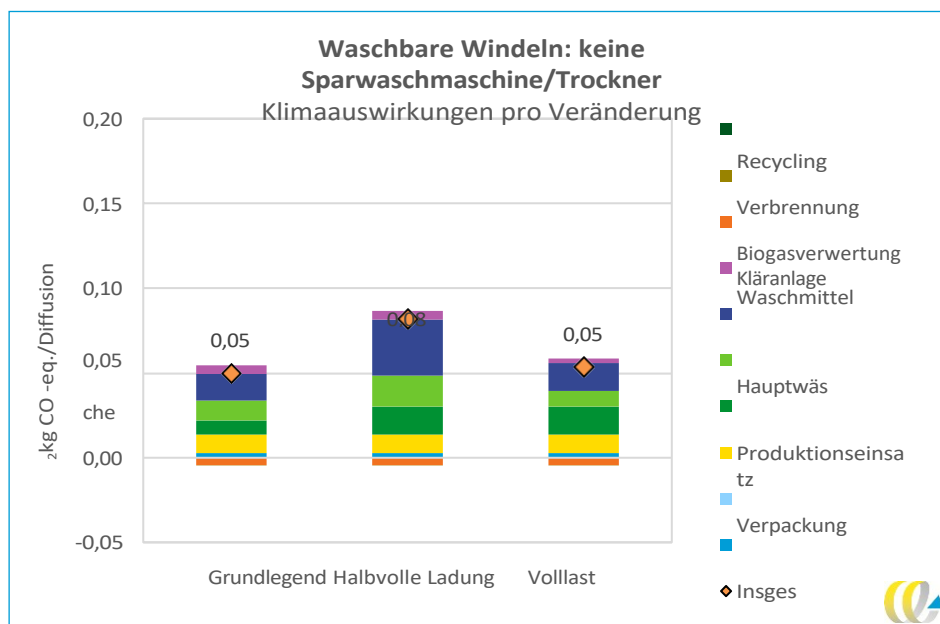
Programm übersteigt zwar eine durchschnittliche 60°C-Wäsche, aber das spielt keine große Rolle bei den Klimaauswirkungen.

Tabelle 7 - Übersicht der Parameter bei ineffizienten Waschmaschinen und Trocknern*

Parameter	Grundlegend	Trockner/Waschmaschine mit hohem Verbrauch	Volle Belastung
Füllmenge der Waschmaschine/des Trockners	50%	50%	100%
Anteil der getrockneten Wäsche (vs. Wäscheleine)	50%	50%	50%
Energieverbrauch Vorwäsche (kWh/Waschgang)	0,13	0,33	0,33
Energieverbrauch Hauptwaschgang (kWh/Waschgang)	0,72	1,11	1,11
Energieverbrauch Trockner (kWh/Waschgang)	2,20	4,63	4,63
Wasserverbrauch Waschmaschine (L/Waschgang)	107	155	155

* Der Strom- und Wasserverbrauch der ineffizienten Waschmaschine und des Trockners ist bei Baumwolle 40°C aus der Stichprobe am höchsten (Anhang A.2.3).

Abbildung 15 - Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln: die Auswirkungen von Waschmaschinen- und Trocknerladungen, wenn sie nicht wirtschaftlich sind



3.4.2 Situation 2: Sparsame Waschmaschine und Trockner, Windeln separat waschen

In dieser Fallstudie untersuchen wir die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln in Haushalten mit sparsamen Geräten. Hier vergleichen wir zwei Fälle: einen, bei dem die Sparwaschmaschine und der Trockner voll beladen sind und weniger verbrauchen als im Basisfall, und einen, bei dem Waschmaschine und Trockner nur zum Waschen und Trocknen von Windeln verwendet werden. Tabelle 8 zeigt die in dieser Fallstudie verwendeten Parameter und Abbildung 16 die daraus resultierenden Klimaauswirkungen. 2Wenn ein



Haushalt eine sehr sparsame Waschmaschine und einen sehr sparsamen Trockner hat und mit einer vollen Ladung bei 40°C wäscht, beträgt die Klimawirkung 0,02 kg CO -eq. pro Wechsel, also nur ein Viertel des Basisfalls. Entscheiden sich die Eltern dafür, die Windeln separat zu waschen, erhöht sich die Auswirkung deutlich auf 46 % *gegenüber* dem Basisszenario.

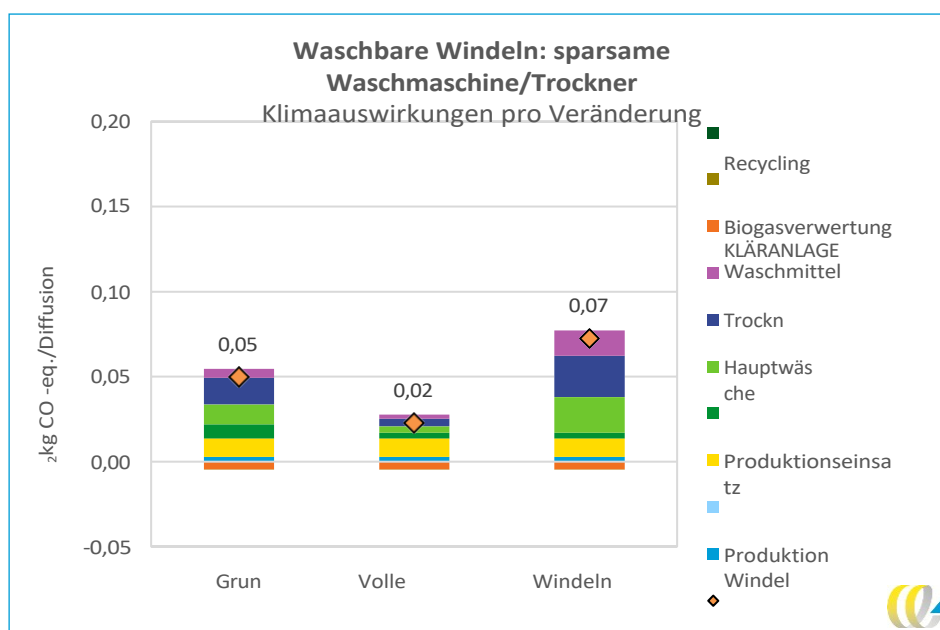


Tabelle 8 - Übersicht über die Parameter bei Economy-Waschmaschinen und -Trocknern*

Parameter	Grundlegend	Volle Belastung	Windeln separat waschen/trocknen
Füllmenge der Waschmaschine/des Trockners	50%	100%	18% (nur Windeln)
Anteil der getrockneten Wäsche (vs. Wäscheleine)	50%	50%	50%
Energieverbrauch Vorwäsche (kWh/Waschgang)	0,13	0,02	0,02
Energieverbrauch Hauptwaschgang (kWh/Waschgang)	0,72	0,45	0,45
Energieverbrauch Trockner (kWh/Waschgang)	2,20	1,20	1,20
Wasserverbrauch Waschmaschine (L/Waschgang)	107	81	81

* Der Strom- und Wasserverbrauch der sparsamen Waschmaschine und des sparsamen Trockners ist der niedrigste in der Stichprobe (siehe Anhang A.2.3).

Abbildung 16 - Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln: Die Auswirkungen des separaten Waschens von Windeln, wenn Waschmaschine und Trockner sparsam sind



3.4.3 Situation 3: kein Spartrockner, Trocknen der Windeln auf der Leine

Die Verwendung von Trocknern trägt erheblich zu den Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln bei (31 % im Basisszenario). In dieser Fallstudie betrachten wir Haushalte mit Trocknern mit hohem Stromverbrauch im Vergleich zum Basisszenario. Wir vergleichen zwei Fälle: einen, in dem alle Windeln maschinell getrocknet werden (im Vergleich zur Hälfte der Windeln im Basisszenario), und einen, in dem alle Windeln auf der Leine getrocknet werden. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 9 und die entsprechenden Klimaauswirkungen in Abbildung 17 dargestellt.

Wenn ein Trockner mit hohem Verbrauch verwendet wird und alle Windeln maschinell getrocknet werden, führt dies zu einer Klimawirkung von 0,10 kg CO₂-eq. pro Wechsel, doppelt so viel wie im Basisfall und 22 % höher als die Klimawirkung von Einwegwindeln mit Recycling.



2Sollte dieser Nutzer alle Windeln auf der Linie trocknen, sinkt die Klimawirkung auf 0,03 kg CO - eq. pro Wechsel, was einer um 31 % geringeren Klimawirkung als im Basisszenario entspricht.

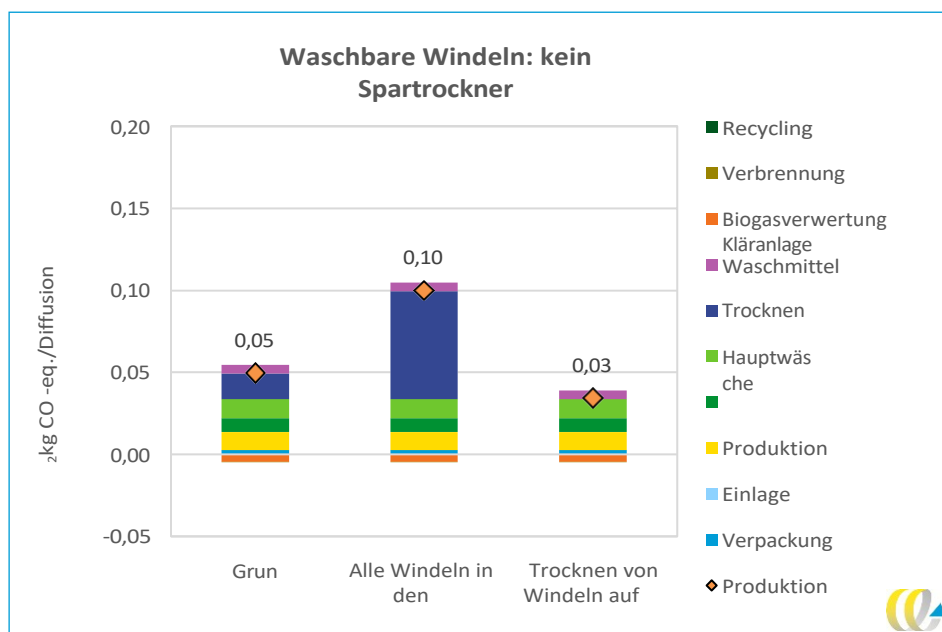


Tabelle 9 - Übersicht über die Parameter bei Trocknern mit hohem Verbrauch*

Parameter	Grundlegend	Trockner mit hohem Verbrauch, alle Windeltrocknung	Alle Windeln an der Leine trocken
Füllmenge der Waschmaschine/des Trockners	50%	50%	50%
Anteil der getrockneten Wäsche (im Vergleich zur Wäscheleine)	50%	100%	0%
Energieverbrauch Vorwäsche (kWh/Waschgang)	0,13	0,13	0,13
Energieverbrauch Hauptwaschgang (kWh/Waschgang)	0,72	0,72	0,72
Energieverbrauch Trockner (kWh/Waschgang)	2,20	4,63	4,63
Wasserverbrauch Waschmaschine (L/Waschgang)	107	107	107

* Der Verbrauch von Trocknern ist der höchste in der Stichprobe (Anhang A.2.3).

Abbildung 17 - Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln: die Auswirkungen eines Trockners mit hohem Verbrauch im Vergleich zum Trocknen von Windeln auf der Straße



3.4.4 Situation 4: begrenzte Wiederverwendung von Windeln

Neben dem Waschen/Trocknen ist die Anzahl der Wiederverwendungen ein wichtiger Parameter für die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln. Die Bedeutung dieses Parameters ist besonders groß, wenn die Anzahl der Wiederverwendungen weniger als 100 beträgt (siehe auch Anhang B). In dieser Fallstudie untersuchen wir die Klimawirkung von waschbaren Windeln in Haushalten, die sparsamer waschen als im Basisszenario, indem sie eine sparsame Waschmaschine und einen sparsamen Trockner voll befüllen.¹¹ Wir betrachten hier zwei Fälle: die Verwendung von Windeln während der gesamten Windelperiode eines Kindes (3,2 Jahre) (im Basisszenario ist dies für zwei Kinder der Fall) und die Verwendung von Windeln für drei Monate. Dies führt zu 225 und 18 Wiederverwendungen pro Windel. Die Parameter hierfür sind in Tabelle 10 aufgeführt. Abbildung 18 zeigt, dass bei einer Wiederverwendung von

¹¹ Dies entspricht der Verwendung von zwei Windelsets unterschiedlicher Größe für zwei Kinder (ob über den Gebrauchmarkt oder nicht). Einige Haushalte verwenden keine All-in-One-Windeln, sondern eine kleinere Größe, gefolgt von einer größeren Größe.



Die achtzehnmalige Verwendung von Windeln erhöht die Auswirkungen der Produktionsphase erheblich, so dass die Klimawirkung 0,09 kg CO₂-eq. pro Wechsel beträgt. Dies ist dreimal höher als die 225-malige Verwendung der Windeln bei gleichem Waschverhalten.

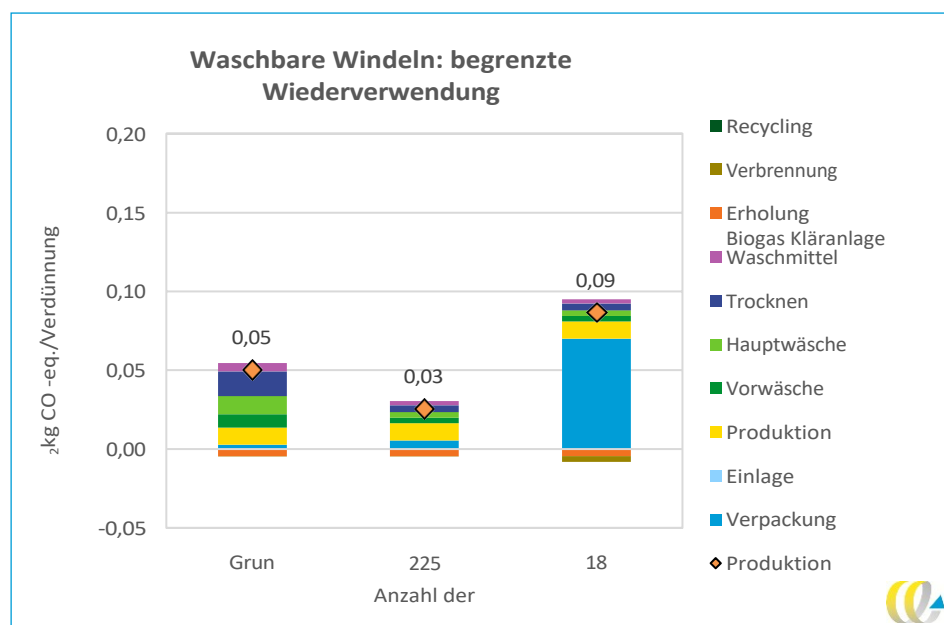
Tabelle 10 - Zusammenfassung der Parameter für die begrenzte Wiederverwendung von waschbaren Windeln bei wirtschaftlichem Waschen und Trocknen, bei voller Beladung

Parameter	Grundlegend	Windeln für ein Kind verwenden wasserkompetentes Kind	Windeln nach drei Monaten verwerfen
Füllmenge der Waschmaschine/des Trockners	50%	100%	100%
Anteil der getrockneten Wäsche (vs. Wäscheleine)	50%	50%	50%
Energieverbrauch Vorwäsche (kWh/Waschgang)	0,13	0,02	0,02
Energieverbrauch Hauptwaschgang (kWh/Waschgang)	0,72	0,45	0,45
Energieverbrauch Trockner (kWh/Waschgang)	2,20	1,20	1,20
Wasserverbrauch Waschmaschine (L/Waschgang)	107	81,00	81,00
Anzahl der Wiederverwendungen	450*	225	18

* Im Basisfall wird davon ausgegangen, dass ein Satz von 24 Windeln für zwei Kinder verwendet wird.

** Beim sparsamen Waschen ist der Verbrauch von Waschmaschine und Trockner in der Stichprobe am niedrigsten (Anhang A.2.3).

Abbildung 18 - Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln: die Auswirkungen einer begrenzten Wiederverwendung von Windeln in Kombination mit sparsamem Waschen und Trocknen



3.5 Einfluss des Strommixes auf die Klimaauswirkungen von Windeln

Der Stromverbrauch hat einen großen Einfluss auf die Umweltbelastung durch die verschiedenen Windelsysteme. In den kommenden Jahren wird sich der Strommix in den Niederlanden jedoch ändern. ¹²Hier untersuchen wir die Auswirkungen dieser Veränderung

auf die Klimaauswirkungen von Windelsystemen, basierend auf den Erwartungen des Klima- und Energieausblicks für 2030 (PBL, 2021).

¹² Für das Jahr 2030 erwartet PBL (2021) eine Stromerzeugung aus 26 % Erdgas, 51 % Wind, 13 % Solarenergie, 5 % Biomasse, 2 % Kernenergie und 2 % Sonstige.



Bei der Modellierung gehen wir von den folgenden Annahmen aus:

- ²²Die Klimaauswirkungen des niederländischen Stroms (der von den Verbrauchern beim Waschen verwendet wird) sinken von 0,44 kg CO₂-eq./kWh in der Basisanalyse auf 0,13 kg CO₂-eq./kWh im Jahr 2030.
- ²¹³Wir gehen davon aus, dass der europäische Strommix im Jahr 2030 (für die Produktion von Einwegwindeln) einem ähnlichen Trend folgt und ebenfalls 0,13 kg CO₂-eq./kWh im Jahr 2030 erreicht.
- Wir lassen die Produktion der waschbaren Windel unverändert, da sie im Vergleich zur Nutzungsphase (Waschen und Trocknen) der Windel vernachlässigbar ist.
- ¹⁴Für das Ende des Lebenszyklus von Einweg- und waschbaren Windeln verwenden wir den niederländischen Strommix 2030. Dies gilt sowohl für das Recycling (verbraucht Strom) als auch für die Verbrennung (vermeidet Strom).
- Für waschbare Windeln analysieren wir sowohl den Basisfall als auch die hohen und niedrigen Auswirkungsszenarien.

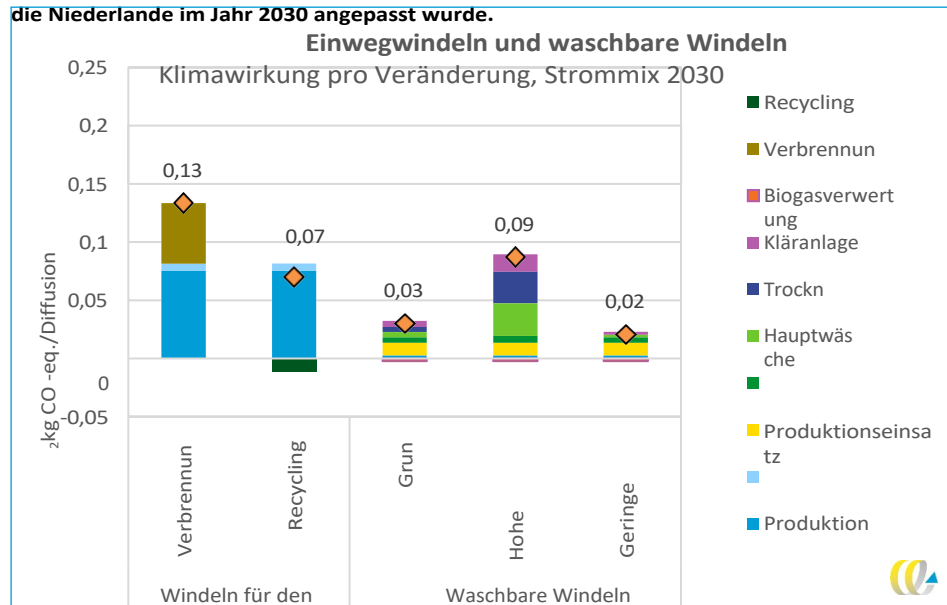
Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse dieser Analyse. Der Strommix 2030 verringert die Auswirkungen aller Windelsysteme. Am stärksten ist der Rückgang bei den waschbaren Windeln mit 40 % im Basisszenario, verglichen mit 7 bzw. 12 % bei den Einwegwindeln mit Verbrennung und Recycling. Vor allem im Szenario mit hohen Auswirkungen für die waschbare Windel - wo die Auswirkungen durch das separate Waschen der Windeln mit ineffizienten Waschmaschinen und Trocknern verursacht wurden - ist der Rückgang der Klimaauswirkungen mit 57 % groß. Folglich sind die Auswirkungen von waschbaren Windeln selbst bei ineffizientem Waschverhalten geringer als die einer Einwegwindel mit Verbrennung. Doch selbst im Jahr 2030 schneidet eine recycelte Einwegwindel immer noch besser ab als die waschbare Windel im Szenario mit hohen Auswirkungen.

¹³ In den *vorgelagerten* Produktionsketten der weltweit hergestellten Stoffe (Acrylsäure, ABS-Copolymer, synthetischer Kautschuk, Polypropylenvliese, NaOH) wurde der Strommix nicht angepasst. Für die Synthese des superabsorbierenden Polymers, die Extrusion für die PE-Schicht der Windel, die Synthese des Flockenzellstoffs und für den Produktionsprozess der Materialien zur Einwegwindel wurde der Strommix jedoch an die Prognose für die Niederlande im Jahr 2030 angepasst.

¹⁴ Die AVI-Energieeffizienz hat sich nicht verändert.



Abbildung 19 - Klimaauswirkungen (kg CO₂-Äq./Schicht) von Einwegwindeln (mit Verbrennung oder Recycling als EOL) und waschbaren Windeln (mit dem Basisszenario Waschen und zwei Szenarien mit hohen und niedrigen Auswirkungen). Die Ergebnisse sind ähnlich wie in Abbildung 13, wobei lediglich der Strommix für die Niederlande im Jahr 2030 angepasst wurde.



4 Auslegung

In diesem Abschnitt erörtern wir zunächst die wichtigsten Annahmen/Unsicherheiten, um die Ergebnisse in einen Kontext zu stellen (Abschnitt 4.1). Darüber hinaus vergleichen wir unsere Ergebnisse mit denen anderer Studien (Abschnitt 4.2). Schließlich erörtern wir, inwieweit unsere Ergebnisse für Babywindeln auch für Inkontinenzmaterialien zutreffen (Abschnitt 4.3).

4.1 Diskussion Annahmen und Ungewissheiten

Das Basisszenario für waschbare Windeln enthält eine Reihe von Annahmen, um die Wahrscheinlichkeit zu minimieren, dass die berechneten Klimaauswirkungen zu niedrig angesetzt sind. Aufgrund dieses konservativen Ansatzes stellt die berechnete Klimawirkung von waschbaren Windeln (in verschiedenen Szenarien) eine obere Grenze der Klimawirkung dar. Andere Annahmen dienen der Vereinfachung des Modells. Das Basisszenario für die waschbare Windel spiegelt keine Standard- oder Durchschnittsnutzung wider, sondern eine Referenz, mit der die Nutzungsszenarien verglichen werden können.

Annahmen/Bemerkungen zu allen Windelsystemen:

- Pro Tag werden 4,6 Windeln gewechselt, und die Windelperiode dauert 3,2 Jahre. Variationen hierzu werden in Abschnitt 3.3 untersucht.
- Die Studie konzentriert sich auf die Nutzung durch niederländische Haushalte. In einem anderen geografischen Kontext oder bei einer anderen Art der Nutzung (z. B. Waschen an einem zentralen Ort) werden die Ergebnisse anders ausfallen.
- Der Transport vom Geschäft zum Verbraucher ist nicht inbegriffen. Da waschbare Windeln seltener gekauft werden, ist auch weniger Transport erforderlich. Andererseits können Einwegwindeln zusammen mit anderen Lebensmitteln gekauft werden, was vermutlich die Umweltauswirkungen des zusätzlichen Transports verringert.

Annahmen zu Einwegwindeln:

- Wir nehmen das Gewicht und die Zusammensetzung einer Windel aus früheren RIVM-Studien (TAUW, 2021) als Durchschnittswert für eine Einwegwindel. Andere Größen und/oder Variationen der Saugfähigkeit wurden nicht untersucht. Mögliche Nachhaltigkeitsoptionen bei der Herstellung von Einwegwindeln (z. B. Verwendung biobasierter Materialien) wurden nicht untersucht.

Annahmen zu waschbaren Windeln:

- Die Windel ist ein All-in-One-Modell. Das ist eine Windel, bei der alle Schichten (der saugfähige Teil und der äußere, wasserabweisende Teil) in einer einzigen Hose untergebracht sind, die bei jedem Windelwechsel komplett gewechselt und gewaschen wird. Es gibt waschbare Windeln, die aus verschiedenen Teilen bestehen (*Booster* - Stoffeinlagen oder Windeln mit getrennten Innen- und Außenhosen, die weniger häufig gewaschen werden). Bei diesen anderen Modellen wird möglicherweise weniger Stoff gewaschen als bei der All-in-One-Windel.
- Die All-in-One-Windel besteht aus 50% Polyester, 25% Baumwolle und 25% Bambusviskose. Dies ist ein geschätzter Durchschnittswert auf der Grundlage der derzeit auf dem Markt befindlichen Produkte. Da die Produktionsphase aufgrund des Recyclings nur einen geringen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln hat (7 % der Klimaauswirkungen im Basisfall), wurden alternative Zusammensetzungen nicht untersucht. Bei den anderen Wirkungskategorien liegt der Anteil der Produktion bei 3-25 %, mit Ausnahme des Wasserverbrauchs: Aufgrund des



höheren Wasserverbrauchs beim Baumwollanbau beträgt der Anteil der Produktion im Basisfall 44 % des gesamten Wasserverbrauchs.



- Für die Herstellung der Windel werden nur die Rohstoffe und die Stoffproduktion berücksichtigt. Die Herstellung vom Stoff bis zur Windel mit allen Verschlüssen und Verpackungen wird als vernachlässigbar angesehen. Aus demselben Grund wird auch die Verpackung von waschbaren Windeln nicht in das Modell einbezogen.
- Die Größe der Windel ist eine "Einheitsgröße" für Kinder von 6-15 kg. Es gibt auch kleinere Größen mit einem geringeren Gewicht, was ebenfalls die Umweltbelastung reduziert.
- Wir gehen von einem Satz von 24 Windeln in einer Größe pro Haushalt aus. Werden mehr Windeln gekauft (z.B. andere Größen), sinkt die Anzahl der Wiederverwendungen pro Windel. Dies wurde in einem separaten Szenario untersucht (Abschnitt 3.4.4).
- Wir gehen davon aus, dass die Windeln mit einer Einlage verwendet werden. Die Auswirkungen sind gering, aber nicht alle Benutzer von waschbaren Windeln werden Einlagen verwenden.
- Der Einsatz wird 2,6 Mal wiederverwendet, bevor er entsorgt wird. Einige Nutzer der Einsätze werden sie nicht wiederverwenden. Dies hat kaum Auswirkungen auf das Klima.
- Die Windeln werden sowohl mit einem Vorwaschgang als auch mit einem Hauptwaschgang gewaschen. Nutzer von Einlagen verwenden möglicherweise keine Vorwäsche (weil der Inhalt der Windel bereits mit der Einlage entsorgt wird). In diesem Fall überschätzen die hier vorgestellten Ergebnisse die Umweltauswirkungen.

Zum Waschen und Trocknen gemäß dem Basisszenario:

- Die Waschmaschine und der Trockner sind halb voll. Die Wirkung einer niedrigeren oder höheren Gebühr wird in den verschiedenen Szenarien dargestellt (Abschnitt 3.4).
- Der Beladungsparameter ist für Trockner und Hauptwäsche derselbe. Es wird davon ausgegangen, dass ein Verbraucher, der absichtlich eine volle Ladung wäscht, dies auch beim Trocknen tut (und umgekehrt).
- Die Windeln werden zum Wickeln von zwei Kindern verwendet. Die Windeln werden an ein zweites Kind in derselben Familie weitergegeben. Es gibt auch einen aktiven Second-Hand-Markt für waschbare Windeln. Die Auswirkungen einer geringeren Wiederverwendung von Windeln werden in einem separaten Szenario untersucht (Abschnitt 3.4.4).
- Die Wäsche wird dreimal pro Woche gewaschen. Dies wurde gewählt, weil die Windeln nicht richtig gewaschen werden können, wenn sie nicht regelmäßig gewaschen werden.
- Es wird ein 40°C-Waschprogramm für Baumwolle verwendet, da eine niedrigere Temperatur nicht empfohlen wird. Auch das Waschen bei 60°C wurde untersucht (Abschnitt 3.4.1).

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Aspekten, die über den Rahmen der untersuchten Frage hinausgehen, aber die Klimaauswirkungen der Windelnutzung beeinflussen. So entscheiden sich Nutzer von waschbaren Windeln möglicherweise eher für wiederverwendbare Windeln als für Einwegwindeln. Windeln, die weniger auslaufen, verursachen weniger Wäsche, so dass die Undichtigkeit eines Windelmodells ebenfalls eine Rolle bei den Umweltauswirkungen einer Windel spielt.

Weitere Faktoren, die die Wahl der Eltern zwischen Einwegwindeln und/oder waschbaren Windeln beeinflussen können, sind die einfache Handhabung der Windel, der Preis und eine mögliche Präferenz für die Verwendung natürlicher Materialien. Diese Faktoren wurden in dieser Studie nicht untersucht.



4.2 Vergleich mit der Meta-Analyse der UN-Studie zu den Ökobilanzen von Windeln

Windeln für den einmaligen Gebrauch

Die Einwegwindel, die nach Gebrauch verbrannt wird, hat in dieser Studie die höchsten Klimaauswirkungen, außer wenn ein sehr negatives Szenario für waschbare Windeln angenommen wird (siehe Abbildung 13). Dies steht im Einklang mit der UN-Studie (UNEP, 2021), die besagt, dass waschbare Windeln grundsätzlich eine geringere Umweltbelastung haben als Einwegwindeln, dass aber die



Der Stromverbrauch beim Waschen und Trocknen kann den Nutzen zunichte machen. Da bei Einwegwindeln hauptsächlich die Produktion für die Klimaauswirkungen verantwortlich ist, kann eine leichtere Windel die Klimaauswirkungen verringern. Es gibt einen Abwärtstrend beim Gewicht von Einwegwindeln (TAUW, 2021). Entsprechend besteht laut der UN-Studie (UNEP, 2021) die wichtigste Möglichkeit zur Verringerung der Umweltauswirkungen von Einwegwindeln darin, leichtere Produkte zu entwickeln.

Leichtere Produkte sollten jedoch nicht dazu führen, dass mehr andere Produkte verwendet werden, weil die Windeln zum Beispiel mehr auslaufen (UNEP, 2021). In dieser Studie vergleichen wir nicht verschiedene Modelle von Einwegwindeln, wie z. B. biobasierte Windeln. Die Verwendung von biobasierten Materialien anstelle von fossilen Materialien für Einwegwindeln kann unter anderem zu einer *Verlagerung der Lasten* auf eine höhere Landnutzung und Wasserknappheit führen. In Ökobilanzstudien gibt es hierzu noch keinen Konsens (UNEP, 2021).

Hier wurde ein Gewicht von 33 Gramm zugrunde gelegt und die Zusammensetzung basiert auf Daten aus dem Jahr 2015. Neue Daten über die aktuelle Zusammensetzung und das Gewicht verschiedener Arten von Wegwerfwindeln würden mehr Gewissheit über die aktuellen Klimaauswirkungen von Wegwerfwindeln bringen.

Die aktuelle Studie zeigt, dass das Recycling von Einwegwindeln im Vergleich zur Verbrennung von Einwegwindeln eine um 41 % geringere Klimaauswirkung hat. Der Vorteil des Recyclings liegt vor allem in der Vermeidung der Verbrennung und der anschließenden Rückgewinnung von Kunststoff und der Erzeugung von Biogas aus den Windelabfällen. Die Rückgewinnung von Kunststoffen ist für das Klima von größerem Nutzen als die Erzeugung von Biogas (CE Delft, 2018). Bei Windeln mit weniger Kunststoff ist der Klimavorteil des Recyclings gegenüber der Verbrennung also geringer.

Waschbare Windeln

Das Verbraucherverhalten bestimmt in hohem Maße, wie der Umweltvergleich zwischen Einwegwindeln und waschbaren Windeln ausfällt. Die Faktoren im Verbraucherverhalten, die sich in der UN-Studie als bestimmend für die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln herausstellen, sind die gleichen wie in unserer Analyse: Waschmaschinenbeladung, Wasser- und Energieeffizienz der Waschmaschinen, Waschen über/unter 60°C (was dem Energieverbrauch entspricht - über 60°C wurde in dieser Studie nicht untersucht), Trocknen der Windeln auf der Leine und die Anzahl der Wiederverwendung der Windeln (UNEP, 2021). Auch TruePrice (2022) kommt zu dem Schluss, dass der Stromverbrauch und insbesondere das Trocknen der Windeln am stärksten zu den Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln beitragen.

Die Schlussfolgerung der UN-Studie ist qualitativ dieselbe wie die dieser Studie: Wenn es ein Recyclingsystem gibt, dann ist die Verwendung von Einwegwindeln mit Recycling besser als waschbare Windeln, die ineffizient gewaschen werden (UNEP, 2021). Mit ineffizient ist gemeint, dass die Waschmaschine nicht vollständig gefüllt wird, die Waschttemperatur über 60°C liegt und ein Trockner verwendet wird. Selbst wenn waschbare Windeln "ein paar Mal" benutzt werden, ist es besser, Einwegwindeln mit Recycling zu verwenden. In unserer Studie wurde die Rolle von Waschmaschine und Trockner speziell für den niederländischen Energiemix und die niederländischen Geräte quantifiziert. Bei Verwendung eines sparsamen Trockners hat eine waschbare Windel, selbst wenn Waschmaschine und Trockner nicht vollständig gefüllt sind, eine geringere Umweltbelastung als Einwegwindeln mit Recycling (Abschnitt 3.4.2).

Dieses Ergebnis wird durch die Sensitivitätsanalyse des Strommixes bestätigt, der für die



Herstellung, Verwendung und Verarbeitung von Einwegwindeln oder waschbaren Windeln verwendet wird (Abschnitt 3.5). A



Ein grünerer Strommix senkt insbesondere die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln, da der Stromverbrauch beim Waschen und Trocknen die Umweltauswirkungen weitgehend bestimmt. Geht man vom Strommix in den Niederlanden im Jahr 2030 aus, so hat eine waschbare Windel selbst bei ineffizientem Waschverhalten eine geringere Klimabelastung als eine Einwegwindel, die verbrannt wird. Wie eine waschbare Windel im Vergleich zu einer Einwegwindel mit Recycling abschneidet, hängt immer noch davon ab, wie sie gewaschen und getrocknet wird.

Bei allen Windeltypen bestimmen die Anzahl der Wechsel pro Tag und das Alter, in dem das Kind aufs Töpfchen geht, die Gesamtumweltbelastung. Wie die Gesamtzahl der Windeln zwischen den verschiedenen Windelsystemen potenziell variiert, wurde in früheren Studien nicht untersucht (UN, 2021). In dieser Studie untersuchten wir den *relativen* Anstieg der Klimaauswirkungen mit zunehmender Anzahl von Windelwechseln beim Töpfchentraining. Je mehr Recycling in einem Windelsystem vorhanden ist, desto weniger steigt die Klimawirkung mit zunehmender Anzahl der Wechsel.

4.3 Material für Inkontinenz

Diese Studie konzentriert sich auf Babywindeln, aber es ist zu erwarten, dass die Schlussfolgerungen für Inkontinenzmaterialien für Erwachsene weitgehend ähnlich ausfallen. Wir erörtern hier einige Faktoren, die den Vergleich für Inkontinenzmaterialien anders gestalten könnten.

Einweg-Inkontinenzmaterialien haben eine ähnliche Zusammensetzung wie Einweg-Babywindeln, jedoch mit einem durchschnittlich höheren Anteil an Flusen und einem geringeren Kunststoffanteil (TAUW, 2021). Wenn die Produkte nach der Entsorgung verbrannt werden, kann dies zu etwas geringeren Auswirkungen führen, da weniger fossiles CO freigesetzt wird.

Der Recyclingprozess ist für Wegwerfwindeln und Inkontinenzmaterialien derselbe und wird derzeit nicht getrennt durchgeführt. Die Zusammensetzung der beiden Produkte ist unterschiedlich, was zu einer unterschiedlichen Ausbeute an Kunststoffen und Biogas führen würde. Eine Tonne Windelabfall enthält 1 % mehr Kunststoff und 11 % mehr Fäkalien/Urin, während Inkontinenzmaterial 15 % mehr Flusen enthält. Infolgedessen könnte die Biogasausbeute von Inkontinenzmaterial als separater Abfallstrom etwas höher sein, da Flusen vollständig vergoren werden können (RIVM, 2016) und Fäkalien/Urin größtenteils aus Wasser bestehen.

Inkontinenzmaterialien für Erwachsene sind jedoch schwerer als Babywindeln, so dass die Auswirkungen der Produktion und des Verbrauchs höher sind. Dies kann auch für waschbare Inkontinenzmaterialien gelten, da sie auch einen größeren Anteil der verfügbaren Kapazität in der Waschmaschine/im Trockner beanspruchen.

Alles in allem erwarten wir keine großen Unterschiede bei den Umweltkennzahlen für Inkontinenzmaterialien. Trotz der etwas höheren Belastung durch den Produktionsprozess (aufgrund des höheren Gewichts) erwarten wir, dass waschbare Inkontinenzmaterialien eine geringere Umweltbelastung aufweisen als Einwegmaterialien. Wie bei den Babywindeln ist auch hier zu beachten, dass die Umweltauswirkungen stark vom Waschverhalten abhängen. Daher gelten die Empfehlungen, die sich aus der Analyse in Abschnitt 3.4 ergeben, auch für Inkontinenzmaterialien.



5 Schlussfolgerung

In dieser Ökobilanz wurden die Umweltauswirkungen der Verwendung von waschbaren Windeln und Wegwerfwindeln für Babys untersucht. Dabei konzentrieren wir uns auf die Verwendung durchschnittlicher Produkte in niederländischen Haushalten. Bei den meisten Umweltauswirkungen hat die waschbare Windel eine geringere Auswirkung als Einwegwindeln, die verbrannt werden. Die Auswirkungen, bei denen die waschbare Windel eine deutlich höhere Umweltbelastung hat, sind der Wasserverbrauch, die Süßwasserökotoxizität und die Eutrophierung von Süß- und Salzwasser. Umgerechnet auf die Schadenskategorien oder "Endpunkte" (menschliche Gesundheit, Ökosysteme und Ressourcen) schneidet die waschbare Windel in jeder Schadenskategorie besser ab als Einwegwindeln. Bei den meisten Umweltauswirkungen liegen die Umweltauswirkungen von Einwegwindeln, die recycelt werden, zwischen denen von waschbaren Windeln und denen von Einwegwindeln, die verbrannt werden. Der Schwerpunkt liegt auf den Auswirkungen auf das Klima ("Kohlenstoff-Fußabdruck") bzw. dem Beitrag zum Klimawandel durch Treibhausgasemissionen.

²Einwegwindeln, die nach Gebrauch verbrannt werden, haben die höchsten Klimaauswirkungen pro Wechsel (0,14 kg CO₂-eq./Wechsel). ²Werden Einwegwindeln recycelt, sinkt die Klimawirkung um 41 % (0,08 kg CO₂-eq./Änderung). ²Im Basisfall beträgt die Klimawirkung von waschbaren Windeln 0,05 kg CO₂-eq./Differenz, was einer Verringerung um 64 % gegenüber Einwegwindeln entspricht, die verbrannt werden. Bei waschbaren Windeln können die Ergebnisse jedoch von einem Haushalt zum anderen stark variieren. ¹⁵Geht man von einem Szenario mit hohen Auswirkungen aus (separates Waschen der Windeln mit einer Waschmaschine und einem Trockner mit hohem Verbrauch), können die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln 50 % höher sein als die von Einwegwindeln, die verbrannt werden. In einem günstigeren Szenario mit geringen Auswirkungen (Waschmaschine mit durchschnittlichem Verbrauch, die vollständig gefüllt ist und auf der Leine trocknet) erhöht sich die Reduzierung auf 82 % im Vergleich zu Einwegwindeln, die verbrannt werden.

Der Strommix hat einen großen Einfluss auf die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln im Besonderen. Die obigen Ergebnisse beziehen sich auf den niederländischen Strommix 2019, bei dem 76 % aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle erzeugt werden (CE Delft, 2022). Wenn wir von einem saubereren Strommix im Jahr 2030 ausgehen, fallen die Klimaauswirkungen des High-Impact-Szenarios für waschbare Windeln *unter die* von verbrannten Einwegwindeln. Mit Recycling schneiden Einwegwindeln jedoch immer noch besser ab als das High-Impact-Szenario für waschbare Windeln.

Andere Studien der Vereinten Nationen (UNEP, 2021) und von True Price (2022) kommen zu demselben Ergebnis, und es dominieren die gleichen Faktoren für die Umweltauswirkungen von Einweg- und Mehrwegwindeln. Unter ähnlichen Bedingungen wie in dieser Studie hat die waschbare Windel eine geringere Auswirkung als Einwegwindeln. Abgesehen von den Auswirkungen auf das Klima schneidet die waschbare Windel bei den anderen Umweltauswirkungen besser ab als die Einwegwindel, mit Ausnahme der Eutrophierung von Süß- und Salzwasser und der Ökotoxizität von Süßwasser. Dies ist hauptsächlich auf die Abwasserbehandlung des Waschwassers und in geringerem Maße auf die Produktion der Baumwolle für die Windel, die Einlage und das Waschmittel zurückzuführen. Auch der Wasserverbrauch ist bei der waschbaren Windel etwas höher.

Während der Windelzeit eines Kindes (d. h. der Zeit bis zum Töpfchentraining) werden etwa



5.400 Windelwechsel sind nötig. Bei waschbaren Windeln ergibt dies eine Klimabelastung von 269 kg

¹⁵ In der Studie von True Price (2022) hat die waschbare Windel in den betrachteten Szenarien eine ähnliche oder geringere Klimawirkung als die Einwegwindel. Allerdings wurden in dieser Studie das Waschen bei höheren Temperaturen oder das Trocknen der Windeln in der Maschine als zwei separate Szenarien betrachtet, während das Szenario mit den hohen Auswirkungen beides kombiniert. Daher ist das Szenario mit hoher Auswirkung aus dieser Studie konservativer.



CO_2 -Äq./gepflegtes Kind in unserem Basisszenario. CO_2 Die gleiche Anzahl von Einweg-Windeln hat bei der Verbrennung eine Klimawirkung von 754 kg CO_2 -eq. und 443 kg CO_2 -eq. bei der Wiederverwertung. Die Verwendung von waschbaren Windeln anstelle von Einwegwindeln kann daher die Klimaauswirkungen der Windelperiode erheblich verringern.

Die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln hängen jedoch stark davon ab, wie ein Haushalt seine Wäsche wäscht. Da die Windeln oft wiederverwendet werden können, sind die Produktions- und Entsorgungsphasen weniger wichtig. Die Auswirkungen von waschbaren Windeln werden daher hauptsächlich von vier Faktoren bestimmt:

- **Beladung der Waschmaschine/des Trockners:** Bei Verdoppelung der Beladung (von halbvoll auf voll) halbiert sich die Klimawirkung. Je höher der Energieverbrauch der Waschmaschine/des Trockners ist (siehe folgende Faktoren), desto größer ist der Einfluss der Beladung.
- **Stromverbrauch von Waschmaschine und Trockner:** Wichtiger als die Waschtemperatur ist, wie sparsam Waschmaschine und Trockner sind. CO_2 Der Strom für das Waschen und Trocknen kostet pro Veränderung im Basisfall 71 Wh oder 0,03 kg CO_2 -eq. CO_2 Das sind 60% der gesamten Klimawirkung eines Wechsels im Basisfall (0,05 kg CO_2 -eq.). Der Stromverbrauch des Trockners spielt eine besondere Rolle: Wenn die Hälfte der Wäsche maschinell getrocknet wird, macht das Trocknen 31 % der Klimawirkung pro Änderung aus. Das Trocknen von Windeln auf der Wäscheleine kann also eine Menge einsparen.
- **Häufige Wiederverwendung:** Die Häufigkeit der Wiederverwendung hängt davon ab, wie viele Hosen (in verschiedenen Größen oder nicht) ein Haushalt kauft und ob sie für ein zweites Kind verwendet werden.
- **Verwendung einer Einlage:** Ohne Einlage sinkt die Klimabelastung um etwa 20 %.

Andere Faktoren (einschließlich der Seifendosierung, der Zusammensetzung der Windeln und der Waschtemperatur) haben keinen großen Einfluss auf die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln.

Aus der Analyse der verschiedenen Situationen in niederländischen Haushalten (Abschnitt 3.4) ergeben sich eine Reihe praktischer Lehren:

- Selbst wenn ein Haushalt nicht über eine sparsame Ausrüstung verfügt, haben waschbare Windeln eine geringere Klimabelastung als Einwegwindeln (selbst wenn sie recycelt werden). Die Auswirkungen können durch eine hohe Maschinenauslastung weiter verringert werden.
- Wenn ein Haushalt über eine sparsame Ausrüstung verfügt und die Windeln getrennt wäscht, ist die Klimabelastung geringer als bei Einwegwindeln (selbst bei Recycling). Das separate Waschen von Windeln erhöht die Klimabelastung erheblich.
- Das Trocknen aller Windeln mit einem ineffizienten Trockner erhöht die Klimabelastung über die von Einwegwindeln, die recycelt werden. Mit einem ineffizienten Trockner ist es daher ratsam, so viel wie möglich auf der Leine zu trocknen.
- Wenn ein Haushalt drei Monate lang waschbare Windeln bei optimalem Waschverhalten verwendet, ist die Klimawirkung die gleiche wie bei der Verwendung von Einwegwindeln, die drei Monate lang recycelt werden. Werden also waschbare Windeln länger als drei Monate verwendet, steigt der Klimanutzen. Andererseits führt die Verwendung neuer waschbarer Windeln für kurze Zeit (< 3 Monate) auch bei nachhaltigem Waschverhalten zu einer höheren Klimabelastung als die Verwendung von Einwegwindeln, die recycelt werden.



6 Quellen

- Butt Boutique**, 2022. *Billenboetiek*, <https://www.billenboetiek.nl/popolini/poplini-inserts/>.
- CE Delft**, 2018a. *LCA Abfallentsorgung von Windelmaterialien*, Delft: CE Delft.
- CE Delft**, 2018b. *Umweltinformationen Textilien: Update 2018*, Delft: CE Delft.
- CE Delft**, 2022. *Kettenemissionen Strom - Aktualisierter Strommix 2019*, Delft: CE Delft.
- Verbraucherverband**, 2018. *So machen wir Wäsche*,
<https://www.consumentenbond.nl/wasmachine/enquete-wasgedrag>.
- Coolblue**, 2022. *Coolblue*, <https://www.coolblue.nl/wasmachines/filter> 15-9-2022.
- Ecoinvent**, 2021 *Ecoinvent-Datenbank Version 3.8* [Online] <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-8/#1610466712069-fcebe4bb-f802>.
- EDANA**, 2015. *Nachhaltigkeitsbericht, 4. Ausgabe*, Brüssel: EDANA,.
- Umweltagentur**, 2008. *An updated lifecycle assessment study for disposable and reusable nappies*, Bristol, UK: Environment Agency.
- Gontia, P.**, 2014. *Ökobilanz der biobasierten Natriumpolyacrylat-Produktion aus Nebenströmen einer Zellstofffabrik - Fallbeispiel einer TMP- und Sulfitzellstofffabrik*, Göteborg, Schweden: Chalmers University of Technology.
- HIER**, 2016. *So oft waschen die Niederländer im Durchschnitt ihre Wäsche*,
<https://www.hier.nu/themas/makkelijk-energie-besparen/zo-vaak-doen-dutch-means-wash>.
- Hoffmann, B. S., de Simone Morais, J. & Teodoro, P. F.**, 2020. Ökobilanzierung innovativer Kreislaufgeschäftsmodelle für moderne Stoffwindeln. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119364.
- ISO**, 2006a. *14040 - Umweltmanagement -- Ökobilanz -- Grundsätze und Rahmen*, Genf: Internationale Organisation für Normung (ISO).
- ISO**, 2006b. *14044 - Umweltmanagement -- Ökobilanz -- Anforderungen und Leitlinien*, Genf: Internationale Organisation für Normung.
- Autor**, Jahr. Titel. Edition ed. Ort der Veröffentlichung: Verlag.
- Nappy's.co.uk**, 2022. *Waschbare Windeln*, Nappy's.co.uk, <https://www.nappys.nl/wasbare-luiers>.
- PBL**, 2021. *Klima- und Energieprognose (KEV) 2021*, Den Haag: Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL).
- RIVM**, 2016. *Verkenning samenstelling luiers en incontinentiemateriaal*, Bilthoven: RIVM.
- RWS**, 2021. *LAP 3 - Anhang F.9: Conducting LCAs in relation to the LAP*, Den Haag: Rijkswaterstaat (RWS).
- SGS Search**, 2021. *Comparative mLCA on waste treatment of diaper and incontinence material*, Amsterdam: SGS Search.
- Shen, L. & Patel, M. K.**, 2008. Life Cycle Assessment of Polysaccharide Materials: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, 16, 154-167.
- STOWA**, 2016. *Handbuch zur Schlammfäulung*, Amersfoort: STOWA.
- STOWA**, 2018. *Theoretische Analyse des Sauerstoffbedarfs von häuslichen Abwässern*, Amersfoort: STOWA.
- Tauw**, 2021. *Untersuchung von Engpässen und Lösungen zur Schließung der Kette für Windeln und Inkontinenzmaterialien*, Deventer: Tauw.
- Wahrer Preis**, 2022. *Der wahre Preis von Windelsystemen*, Amsterdam: True Price.
- UNEP**, 2021. *Single-use nappies and their alternatives: Recommendations from Life Cycle Assessments*: United Nations Environment Programme.
- VANG Household Waste**, 2022. *Windelkette*, <https://vang-hha.nl/luierketen/>.



A Bestandsaufnahme

A.1 Windel für den einmaligen Gebrauch

A.1.1 Produktion

Die Zusammensetzung der Windeln ist aus früheren, von RWS in Auftrag gegebenen Studien bekannt (Tauw, 2021, RIVM, 2016) und in Tabelle 11 dargestellt. Die notwendigen Inputs für den Produktionsprozess (Energie, Wasser) stammen aus Hoffman *et al.* (2020).

Tabelle 11 - Datenbestand für die Herstellung einer Einwegwindel

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Flockenzellstoff	g	9,1	<i>Sulfatzellstoff, ungebleicht {RER} Markt für Sulfatzellstoff, ungebleicht</i>
SAP	g	12,6	Proprietäres Modell für die Herstellung von Natriumpolyacrylat, siehe Tabelle 12
Polypropylen	g	7,9	<i>Textil-, Vliesstoff-Polypropylenmarkt {GLO} Markt für Textil-, Vliesstoff-Polypropylen</i>
Polyethylen	g	1,8	<i>Verpackungsfolie, Polyethylen niedriger Dichte {RER} Produktion</i>
Kleber	g	1,2	<i>Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer {GLO} - Markt für</i>
Andere	g	0,2	Im Vergleich zu den Gesamtauswirkungen vernachlässigbar
Elastisch	g	0,5	<i>Synthetischer Kautschuk {GLO} Markt für</i>
Verpackung			
PE-Folie	g	3,6	<i>Verpackungsfolie, Polyethylen niedriger Dichte {RER} Produktion</i>
Pappkarton	g	0,5	<i>Faltschachtelkarton {RER} Markt für Faltschachtelkarton</i>
Produktionsprozess			
Elektrizität	Wh	52,8	<i>Elektrizität, Mittelspannung {RER} Marktgruppe für</i>
Wärme	kJ	20	<i>Wärme, Fern- oder Industrierwärme, Erdgas {RER} Marktgruppe für</i>
Wasser	g	2	<i>Wasser, deionisiert {Europa ohne Schweiz} Markt für Wasser, deionisiert</i>

Tabelle 12 - Datenbestand für die Herstellung von 1 kg Natriumpolyacrylat (Gontia, 2014)

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Ammoniumperoxydisulfat	kg	0,005	Siehe Tabelle 13
Acrylsäure	kg	0,782	<i>Acrylsäure {RER} Markt für Acrylsäure</i>
NaOH	Kg	0,468	<i>Natriumhydroxid, ohne Wasser, im Zustand einer 50%igen Lösung</i>
Wasser	Liter	1,753	<i>Leitungswasser {RER} Marktgruppe für</i>
Elektrizität, mittel V	MJ	7,83	<i>Elektrizität, Mittelspannung {RER} Marktgruppe für</i>
Ausgabe			
Abwasser	Liter	1,953	<i>Abwasser, Durchschnitt {Europa ohne Schweiz} Markt für Abwasser, Durchschnitt</i>



Tabelle 13 - Inputs für die Produktion von 1 kg Ammoniumperoxydisulfat (Gontia, 2014)

Eingabe	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Schwefelsäure	kg	0,578	<i>Schwefelsäure {RER} Markt für Schwefelsäure</i>
Ammoniumsulfat	kg	0,429	<i>Ammoniumsulfat {RER} Markt für Ammoniumsulfat</i>
Elektrizität	kWh	2	<i>Elektrizität, Mittelspannung {RER} Marktgruppe für</i>

A.1.2 Verbrennung

Tabelle 14 zeigt die relative Zusammensetzung von gebrauchten Windeln im Abfallstrom, basierend auf TAUW (2021).

Die Modellierung des Transports und der Verbrennung der verschiedenen Komponenten erfolgt gemäß (CE Delft, 2018a). Basierend auf der Zusammensetzung aus Tabelle 14 gehen wir von einem unteren Heizwert von 4,9 MJ/kg aus, wobei wir die gleiche Methode wie in früheren Untersuchungen anwenden (CE Delft, 2018a).

Die Verbrennung wurde anhand der Leistung einer durchschnittlichen niederländischen Verbrennungsanlage mit einem thermischen Wirkungsgrad von 19 % und einem elektrischen Wirkungsgrad von 16 % modelliert (CE Delft, 2018).

Die bei diesem Prozess erzeugte Wärme und Elektrizität wurden als vermiedene Emissionen berücksichtigt.

Tabelle 14 - Zusammensetzung von Einwegwindelabfällen

Material	Windel (Gew.-%)
Fluff-Pulp	5,5%
SAP	7,7%
Polypropylen (Vliesstoff)	4,8%
Polyethylen	1,1%
Kleber	0,7%
Andere	0,1%
Elastisch	0,3%
Urin + Fäkalien ¹⁶	76,7%
Plastiktüten (PE)	3,0%

A.1.3 Recycling

Das Recycling von Einwegwindeln wurde aus einer früheren Studie über die Abfallentsorgung von Windeln und Inkontinenzmaterialien von (CE Delft, 2018a) übernommen.

Hier wurde der Strommix an den durchschnittlichen niederländischen Mix für 2019 angepasst (CE Delft, 2022).

A.2 Waschbare Windel

A.2.1 Zusammensetzung

Um die Zusammensetzung einer waschbaren All-in-One-Windel zu bestimmen, wurde eine

Probe entnommen (Tabelle 15). Die Klimabelastung der gebräuchlichsten Materialien ist ähnlich, nur

¹⁶ Dieser Wert umfasst das Erhitzen von Wasser von 15°C auf 100°C und die Verdunstung.



Bei Bambusviskose sind die Klimaauswirkungen etwas geringer (Tabelle 16). Auf der Grundlage dieser Angaben und der Tabelle 15 gehen wir von einer konservativen Zusammensetzung von 50 % Baumwolle, 25 % Polyester und 25 % Bambusviskose aus.

Tabelle 15 - Beispiel für die Zusammensetzung von waschbaren All-in-One-Windeln (Nappy's.co.uk, 2022)

Waschbares Windelmodell	Materialien
Wizard Uno Bio-Baumwolle (3-16 kg)	82% Bio-Baumwolle, 18% Polyester (Einsatz) Hose 100% Polyester mit PUL*&
Wizard Uno trocken bleiben (3-16 kg)	100% Polyester mit PUL*
Blümchen AIO (4-16 kg)	Futter: 80% Bambus, 20% Polyester, Innenschicht 80% Polyester, 20% Polyacryl, Außenschicht 100% Polyester mit PUL*
Elskbar AIO (6-18 kg)	Außen 100% Polyester mit TPU*, innen 85% Bambus, 15% Polyester, Einsatz idem oder 70% Bambus, 30% Bio-Baumwolle
Grovia Neugeborene (2-5,5 kg)	Außenseite 100% Polyester mit TPU*, Innenseite 100% Polyester (Fleece), Einsatz 55% Hanf und 45% Baumwolle
Leuchtturm AIO (2,2-5,4 kg)	Außen 100% Polyester mit TPU*, Innen 100% Polyester, fester Einsatz Bambus mit Vlies auf einer Seite, loser Einsatz: Bambus
Lil Joey neugeboren (neugeboren)	100% Polyester mit TPU*

* TPU: Thermoplastisches Polyurethan; PUL: Polyurethan-Laminat.

Tabelle 16 - Klimaauswirkungen der in waschbaren Windeln verwendeten Materialien (CE Delft, 2018b)

Material (unlackiert)	Hanf	Baumwolle	Polyester	Bambus-Viskose
kg CO ₂ -Äq. pro 130 g Stoff	1,30	1,39	1,31	0,48

A.2.2 Produktion

Tabelle 17 zeigt, wie die Produktion der Windel und der Einlage modelliert wird. Die Verarbeitung des Stoffes zur Windel ist im Modell nicht enthalten. Bei einer Änderung wird die Auswirkung von 130 g Windel auf 450 Wiederverwendungen aufgeteilt, d. h. 0,3 g.

Die Einlage wurde als 1,4 g Seidenpapier betrachtet, wie in der Studie der Umweltagentur (2008). Für einen Wechsel werden 0,4 Einlegeblätter verwendet, da sie 2,6 Mal wiederverwendet werden können.

Tabelle 17 - Herstellung einer waschbaren Windel und ihrer Einlage

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Baumwolle	g	65	<i>Textilien, gewebte Baumwolle {GLO} Markt für</i>
Polyester	g	32,5	<i>Polyestergewebe (PET-Neuware), gewebt und gefärbt (CE Delft, 2018b)</i>
Bambus-Viskose	g	32,5	<i>Bambus angepasst Faserproduktion, Viskose GLO</i>
	g	32,5	<i>Weberei, Kunstfaser {GLO} Markt für Weberei, Kunstfaser</i>
Einlagen, Zellulose	g	1,4	<i>Tissue-Papier {GLO} Markt für</i>



A.2.3 Waschen und Trocknen

Wir gehen davon aus, dass die Windeln zu Hause gewaschen und getrocknet werden. Tabelle 18 zeigt die Daten, die zur Berechnung der Umweltauswirkungen verwendet wurden.

Wir gehen davon aus, dass 50 g Waschmittel für die Hauptwäsche verwendet werden.
¹⁷Dies basiert auf dem durchschnittlichen Verkauf von Textilwaschmitteln in den Niederlanden im Jahr 2016 (19,2 g/p.d, STOWA (2018)) und einer durchschnittlichen Anzahl von Wäschen von 2,9 Wäschen pro Person pro Woche (HERE, 2016).

Der durchschnittliche Wasser- und Stromverbrauch von Waschmaschinen und Trocknern wurde anhand einer Stichprobe mit dem Angebot von Coolblue (2022) ermittelt. Die Durchschnittswerte für die verschiedenen Wasch- und Trockenprogramme sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die Stichprobendaten sind in Tabelle 20 für Waschmaschinen und in Tabelle 21 für Trockner aufgeführt.

Tabelle 18 - Datenbestand für das Waschen und Trocknen waschbarer Windeln. Hier angegeben für eine Änderung gemäß dem Basisszenario (siehe Abschnitt 2.3.2)

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Elektrizität, Vorwaschen	kWh	0,0121	Elektrizitätsmix NL 2019 (CE Delft, 2022)
Elektrizität, Hauptwäsche	kWh	0,0234	Elektrizitätsmix NL 2019 (CE Delft, 2022)
Elektrizität, Trockner	kWh	0,0358	Elektrizitätsmix NL 2019 (CE Delft, 2022)
Wasser, Vorwaschen	Liter	4,2	<i>Leitungswasser {Europa ohne Schweiz} Markt für</i>
Wasser, Hauptwäsche	Liter	2,0	<i>Leitungswasser {Europa ohne Schweiz} Markt für</i>
Waschmittel, Hauptwäsche	g	0,0325	<i>Waschmittel, fest {GLO}</i>
Ausgabe			
Abwasserbehandlung (Vor- und Hauptwäsche)	Liter	6,2	<i>Abwasser, aus Wohnsitz {CH} Markt für Abwasser, aus Wohnsitz</i>

Tabelle 19 - Durchschnittlicher Strom- und Wasserverbrauch von Waschmaschinen und Trocknern auf dem derzeitigen Markt. Mittelwert und Standardabweichung auf der Grundlage von Tabelle 20 und Tabelle 21. Nicht alle Waschmaschinen haben alle Programme. Die Anzahl der in der Stichprobe verwendeten Waschmaschinen/Trockner ist in der letzten Spalte angegeben

Programm	Elektrizitätsverbrauch (kWh)		Wasserverbrauch (L)		Menge Wachs (kg)	Anzahl der Maschinen
	Durchschnitt	Standardabweichung	Durchschnitt	Standardabweichung		
Waschen Baumwolle 60	1,11	0,45	75,5	44,3	Normalisiert für 8 kg	6
Waschen Baumwolle 40	0,72	0,46	61,7	41,6	Normalisiert für 8 kg	3
Waschen Kurzprogramm (kalt)	0,13	0,15	45,3	14,5	3,625 kg	4



Trockner (Baumwolle)	2,29	1,40	K.A.	K.A.	Normalisiert für 8 kg	8
-------------------------	------	------	------	------	--------------------------	---

¹⁷ 19,2 g/Tag. * 7 d/Woche /2,9 Wäsche/(p.Woche) = 46 g/Wäsche.



Tabelle 20 - Beispiele für Waschmaschinen auf dem niederländischen Markt (Coolblue, 2022)

Energie etikett	Modell	Programm	Temperatur (°C)	kWh/Waschgang	Kg wurde	kWh/kg	kWh für 8 kg Hypothek enwäsche	Wasser (L) pro war	L für war 8 kg
A	Samsung WW8*T9*6***, 8 kg	Baumwolle	20	0,354	8	0,04	0,35	122	122
A	Miele WSF363WCS, 8 kg	Baumwolle	20	0,4	8	0,05	0,40	72	72
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Baumwolle 20	20	0,58	7	0,08	0,66	96	110
A	Samsung WW90T534AAW, 9 kg	Baumwolle 20	20	0,357	9	0,04	0,32	117	104
A	Samsung WW8*T9*6***, 8 kg	Öko 40-60	25	0,402	4	0,10	0,80	69	138
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Öko 40-60	?	0,98	7	0,14	1,12	52	59
A	Miele WSF363WCS, 8 kg	Öko 40-60	31	0,42	4	0,11	0,84	62	124
A	Samsung WW90T534AAW, 9 kg	Öko 40-60	31	0,809	9	0,09	0,72	71	63
A	Samsung WW8*T9*6***, 8 kg	Synthetisch	40	0,68	4	0,17	1,36	66	132
A	Miele WSF363WCS, 8 kg	Schnellkraft-wash	40	0,58	4	0,15	1,16	40	80
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Baumwolle 40	40	1,1	7	0,16	1,26	96	110
B	Samsung WW8*TA*4***, 8 kg	Baumwolle 40	40	0,47	8	0,06	0,47	37	37
B	Samsung WW7*TA*4***, 7 kg	Baumwolle 40	40	0,39	7	0,06	0,45	34	38
A	Samsung WW90T534AAW, 9 kg	Synth 40	40	0,68	4	0,17	1,36	68	136
A	Samsung WW90T534AAW, 9 kg	Baumwolle 60	55	1,504	9	0,17	1,34	134	119
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Baumwolle 60	60	0,99	7	0,14	1,13	52	59
A	Samsung WW8*T9*6***, 8 kg	Baumwolle 60	60	1,674	8	0,21	1,67	142	142
A	Miele WSF363WCS, 8 kg	Baumwolle 60	60	1,35	8	0,17	1,35	57	57
B	Samsung WW8*TA*4***, 8 kg	Baumwolle 60	60	0,56	8	0,07	0,56	37	37
B	Samsung WW7*TA*4***, 7 kg	Baumwolle 60	60	0,52	7	0,07	0,59	34	38
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Baumwolle 90	90	2,45	7	0,35		98	
A	Samsung WW90T534AAW, 9 kg	Kurzprogramm kalt	15	0,015	2	0,01		43	
A	Miele WSF363WCS, 8 kg	Kurzprogramm Express 20 (40 Grad)	27	0,33	3,5	0,09		30	
D	Beko WTV77111BW01, 7 kg	Xpress 30	30	0,15	7	0,02		65	
A	Samsung WW8*T9*6***, 8 kg	Kurzes Programm kalt	15	0,015	2	0,01		43	

Tabelle 21 - Beispiele für Trockner auf dem niederländischen Markt (Coolblue, 2022)

Energie etikett	Modell	Waschprogramm	kWh/Waschprogramm	kg/Waschprogramm	kWh/kg	kWh für eine hypothetische Wäsche von 8 kg
A+++	Bosch WTU87675	Baumwolle - schranktrocken	1,44	8	0,18	1,4
A+++-10%	Miele TSF763WP	Baumwolle - schranktrocken	1,2	8	0,15	1,2
B	Bosch WTG846C0NL	Baumwolle - schranktrocken	4,63	8	0,58	4,6



Energie etikett	Modell	Waschprogramm	kWh/Waschprogramm	kg/Waschprogramm	kWh/kg	kWh für eine hypothetische Wäsche von 8 kg
A+++	AEG T8DBE86W	Baumwolle - schranktrocken	1,31	8	0,16	1,3
A++	AEG T7DB84PK	Baumwolle - schranktrocken	1,59	8	0,20	1,6
A++	Beko DF8421TX0	Baumwolle öko	1,97	8	0,25	2,0
A++	Samsung DV70TA000TE	Baumwolle	1,65	7	0,24	1,9
B	Hooever NDE C8TBEX-S	Baumwolle	4,63	8	0,58	4,6
A++	Siemens WT45W475NL	Baumwolle - schranktrocken	1,93	8	0,24	1,9

A.2.4 Biogaserzeugung in der Kläranlage

Die Verwendung von waschbaren Windeln führt zu einem Anstieg der organischen Substanz im Abwasser, die aus Urin und Fäkalien stammt und aus der Biogas gewonnen werden kann. Eine gebrauchte Windel enthält durchschnittlich 7,6 g organische Trockensubstanz (ODS) (Tabelle 22).

Tabelle 22 - Menge an Urin, Fäkalien und organischer Trockenmasse pro Wechsel

	¹ Gesamt (g)	² Urin (g)	Fäkalien (g)	³ ODS (g)
Inhalt 1 gebrauchte Windel	126	103,2	22,8	7,6

¹ TAUW, 2021.

² Das Verhältnis von Urin zu Fäkalien beträgt laut Umweltagentur (2008) 82 % Urin und 18 % Fäkalien.

³ Der mittlere Wert für den Gehalt an organischer Trockensubstanz in Fäkalien liegt bei 25 % (Gew.-%). Davon sind 84-93 % organisch (hier 89 %) (Rose et al., 2015). Urin besteht zu 91-96% aus Wasser. Hier werden 93,5% aufgenommen (d.h. 6,5% Trockenmasse). Von der Trockensubstanz bestehen 65-85% aus organischem Material (75% entnommen), wovon die Hälfte Harnstoff ist (Rose et al., 2015), der wenig Kohlenstoff enthält und somit wenig zur Biogasproduktion beiträgt. Insgesamt ergibt dies einen ODS für die Windel von $0,25 \cdot 0,89 \cdot 22,8 \text{ g} + 0,065 \cdot 0,75 \cdot 0,5 \cdot 103,2 \text{ g} = 7,6 \text{ g}$.

Der Strom und die Wärme, die aus dem gewonnenen Biogas erzeugt werden können, sowie die bei diesem Prozess freigesetzten Emissionen sind in Tabelle 23 aufgeführt. In der Praxis liegt die Biogasproduktion aus der Schlammfäulung typischerweise zwischen 200-500 l Biogas pro kg ODS (STOWA, 2016). Hier nehmen wir einen Durchschnittswert von 350 l/kg ODS an. Dies entspricht 2,66 l Biogas pro Windelwechsel ($350 \text{ l/kg} \cdot 7,6 \text{ g} = 2,66 \text{ l}$).

³Der durchschnittliche Heizwert von Biogas schwankt zwischen 20-23 MJ/Nm (STOWA, 2016). ³Hier gehen wir von 21,5 MJ/Nm als Durchschnittswert aus.

Der elektrische und thermische Wirkungsgrad der durchschnittlichen KWK liegt bei 37 % bzw. 53 % (Ecoinvent, 2021).



Tabelle 23 - Datenbestand für die Abwasserbehandlung bei der Verwendung von waschbaren Windeln, pro Umstellung

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Organische Trockenmasse	g	7,6	-
Produktion von Biogas	Liter	2,66	-
Vermeidete Stromerzeugung durch Biogas in KWK	Wh	5,88 ¹	Durchschnittlicher niederländischer Strom 2019
Vermeidete Wärmeerzeugung durch Biogas in KWK	kJ	30,3 ²	<i>Wärme, Fern- oder Industrierwärme, Erdgas {Europa ohne Schweiz} Markt für Wärme, Fern- oder Industrie, Erdgas</i>
Ausgabe			
Emissionen aus der Verbrennung von Biogas zur Stromerzeugung	Wh	5,88	Emissionen aus <i>Elektrizität, Hochspannung, Kraft-Wärme-Kopplung, Biogas, Gasmotor.</i>
Emissionen bei der Verbrennung von Biogas zur Wärmeerzeugung	kJ	30,3	Emissionen aus: <i>Wärme, zentral oder in kleinem Maßstab, außer Erdgas {NL} Wärme-Kraft-Kopplung, Biogas, Gasmotor.</i>

¹ $^3 2.66L * 0.37 * 21.5 \text{ MJ/Nm} .$

² $^3 2.66L * 0.53 * 21.5 \text{ MJ/Nm} .$

A.2.5 Verbrennung

Der Transport und die Effizienz der Verbrennungsanlage bei der Verbrennung werden genauso modelliert wie bei der Einwegwindel (CE Delft, 2018a) und in Tabelle 24 dargestellt. Der Unterschied besteht darin, dass für einen Wechsel die Verbrennung der Windel durch 450 geteilt wird, also durch die Anzahl der Wiederverwendung der waschbaren Windel vor der Entsorgung.

Tabelle 24 - Datenbestand zur Verbrennung einer waschbaren Windel

Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Eingabe			
Verbrennung von Baumwolle und Viskose	g	97,5	<i>Textilabfälle, verschmutzt {CH} Behandlung von, kommunale Verbrennung</i>
Verbrennung von Polyester	g	32,5	<i>Textilabfälle, verschmutzt {CH} Behandlung von, kommunale Verbrennung</i>
Transport zur Kläranlage (pro Tonne Windeln)	tkm	80	<i>Transport, Fracht, Lastkraftwagen 16-32 Tonnen, EURO5 {Transport, Fracht, Lastkraftwagen 16-32 Tonnen, EURO5</i>
Vermeidete Emissionen aus der Stromerzeugung (Baumwolle/Viskose)	MJ/kg	2,72 ¹	Durchschnittlicher niederländischer Strom 2019
Vermeidete Emissionen aus der Wärmeerzeugung (Baumwolle/Viskose)	MJ/kg	3,23 ²	<i>Wärme, Fern- oder Industrierwärme, Erdgas {RER} Marktgruppe für</i>
Vermeidete Emissionen aus der Stromerzeugung (Polyester)	MJ/kg	3,52 ³	Durchschnittlicher niederländischer Strom 2019



Verfahren/Material	Einheit	Menge	Modell der Umweltauswirkungen <i>Ecoinvent-Verfahren sind kursiv gedruckt</i>
Vermeidete Emissionen aus der Wärmeerzeugung (Polyester)	MJ/kg	4,18 ⁴	<i>Wärme, Fern- oder Industriewärme, Erdgas {RER}/ Marktgruppe für</i>

¹ = Elektrischer Wirkungsgrad von AVI * LHV von Baumwolle. Der LHV von Baumwolle beträgt laut Pięgsa (2010) 17 MJ/kg.

² = Thermischer Wirkungsgrad AVI * LHV von Baumwolle. Der LHV von Baumwolle beträgt laut (2010) 17 MJ/kg.

³ = Elektrischer Wirkungsgrad von AVI * LHV von Polyester. Der LHV von Polyester beträgt laut Shen und Patel (2008) 22 MJ/kg.

⁴ = Thermischer Wirkungsgrad AVI * LHV von Polyester. Der LHV von Polyester beträgt nach Shen und Patel (2008) 22 MJ/kg.



B Dominante Faktoren waschbare Windeln

In dieser Analyse untersuchen wir, welche Faktoren/Parameter den größten Einfluss auf die Klimaauswirkungen von waschbaren Windeln haben. In dieser Sensitivitätsanalyse wird der Basisfall als Referenz genommen. Die Werte für jeden Parameter werden als Prozentsatz im Verhältnis zum Basisfall ausgedrückt. Dann wird jeweils ein Parameter variiert. Der Grad der Zunahme/Abnahme der Klimaauswirkungen zeigt dann, welchen Einfluss dieser Parameter auf die Klimaauswirkungen hat. Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Sensitivitätsanalyse. Je steiler die Linie ist, desto größer ist der Einfluss des Parameters auf die Klimaauswirkungen.

Der Stromverbrauch ist ein wichtiger Parameter für die Klimaauswirkungen von Windeln. Er wird durch eine Kombination anderer Faktoren bestimmt, wie z. B. den Verbrauch des Vorwasch-, Hauptwasch- und Trockenprogramms, die Anzahl der Wäschen pro Woche, die Kapazität der Waschmaschine oder des Trockners und den Anteil der Wäsche, der getrocknet wird. Hier überwiegen die beiden auf den Trockner bezogenen Parameter die anderen Parameter.

Ein sehr wichtiger Parameter ist die Beladung der Waschmaschine. Die Anzahl der Wiederverwendung der Windeln hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Klimaauswirkungen, insbesondere bei niedrigen Prozentsätzen (< 50 %).

Weniger wichtige Parameter sind der Waschmittelverbrauch, der Wasserverbrauch beim Waschen und das Einlegen.

Abbildung 20 - Sensitivitätsanalyse der Parameter für den Stromverbrauch beim Waschen und Trocknen von Windeln

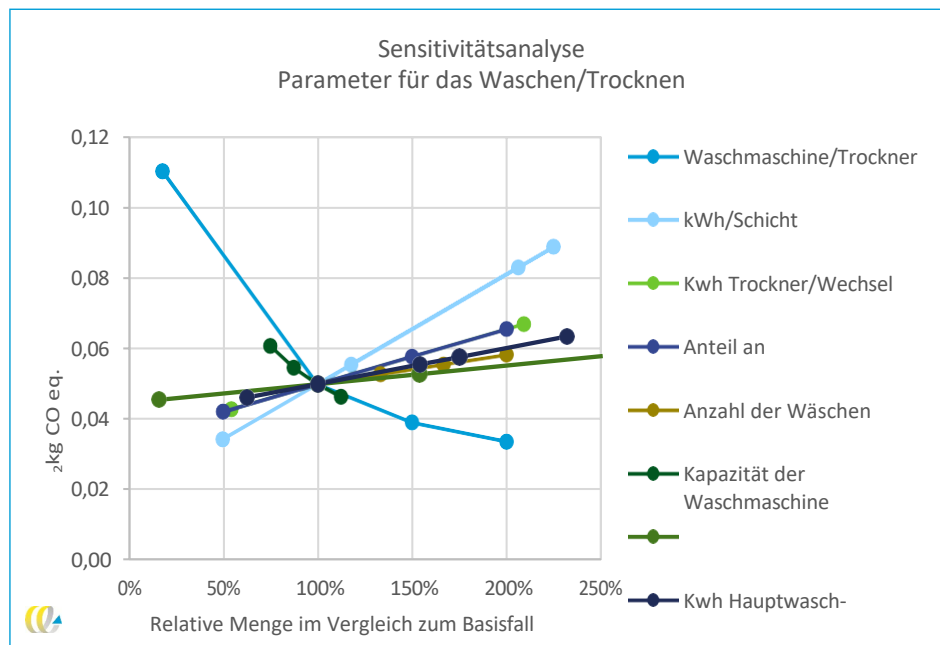
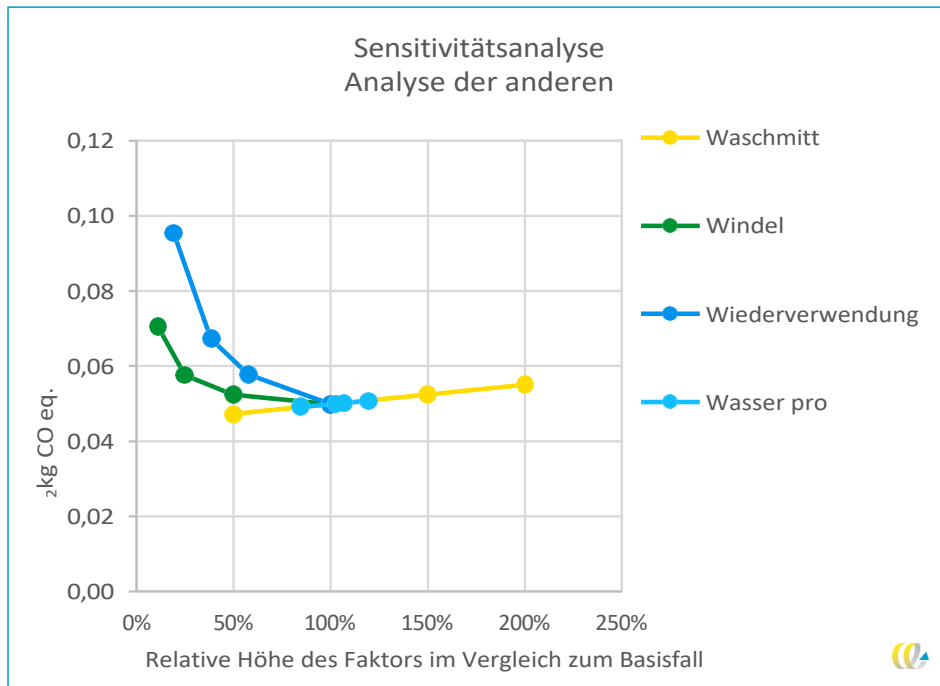


Abbildung 21 - Sensitivitätsanalyse der anderen Parameter des Modells für die Umweltauswirkungen von waschbaren Windeln



C Einzelne Ergebnisse

Neben den Endpunkten (Abschnitt 3.1.2) können die verschiedenen Midpoint-Ergebnisse auch verglichen werden, indem sie zu einem so genannten Single Score summiert werden. Zu diesem Zweck werden die verschiedenen Midpoint-Indikatoren normiert und gewichtet. Diese Gewichtung bestimmt, wie wichtig eine Umweltauswirkung im Verhältnis zu anderen Umweltauswirkungen ist, und ist von Natur aus subjektiv. Gemäß den ISO-Normen für Ökobilanzen dürfen gewichtete Ergebnisse daher nicht in ähnlichen Ökobilanzstudien verwendet werden. Die nachstehende Analyse dient daher nur dazu, die ungefähr wichtigsten Umweltauswirkungen zu ermitteln.

Abbildung 22 zeigt die Einzelbewertung für Einweg- und waschbare Windeln (berechnet nach der ReCiPe 2016 H/A-Perspektive) und den Beitrag der verschiedenen Umweltauswirkungen. Es ist zu erkennen, dass die Klimaauswirkungen die wichtigsten Umweltauswirkungen sowohl für Einweg- als auch für waschbare Windeln sind. Die Klimabelastung verursacht etwa 45 % bis 55 % der gesamten Umweltbelastung. Nach der Klimabelastung ist die Feinstaubbildung mit einem Anteil von 30 bis 35 % die wichtigste Umweltbelastung.

Abbildung 22 - Die ReCiPe 2016 Einzelwertung von Einweg- und waschbaren Windeln, pro Wechsel

