

Introducing Life Cycle Analysis to Pre-University Students as an Education for Sustainable Development Toolkit: A Pilot Study

MASTER'S THESIS FOR SCIENCE EDUCATION AND COMMUNICATION – APRIL 2023

MICHIEL VAN GROOTEL

GRADUATE SCHOOL OF TEACHING

FREUDENTHAL INSTITUTE

Table of Contents

Abstract.....	2
Introduction	3
Sustainable Development	3
Education for Sustainable Development	4
Environmental literacy in ESD.....	4
Action competence in ESD.....	5
Implementing ESD and Its limitations.....	6
ESD in the curriculum.....	7
ESD within chemistry class.....	7
Life Cycle Analysis as an Educational Tool for ESD in Chemistry Class	8
Argumentation to convey knowledge and understanding	9
Knowledge gaps	10
Research aims and questions.....	11
Methods.....	12
Design of the prototype lesson series.....	12
Prototype Walkthrough	15
Prototype Micro-evaluation.....	15
Data Collection and Analysis.....	16
Results.....	17
Consistency.....	17
Changes in subject	17
Overarching consistency	18
Expected effectiveness.....	19
Adoptability for teachers	19
Effectivity in sustainability education	19
Meeting learning goals.....	20
Expected Practicality	21
Suitability in curriculum	21
Time management.....	22
Usability	23
Relevance	24
Current sustainability topics	24
Evoking interest	25
Relevance of data.....	26

Discussion and Conclusion	27
Is the lesson series consistent in its content, style, and format (RQ1)	27
Is the lesson series expected to effectively achieve its learning goals through productive educational methods? (RQ2)	28
Is the lesson series expected to fit in a practical manner within Dutch vwo 5 education? (RQ3).....	30
Is the lesson series relevant to chemistry and sustainability? (RQ4)	31
Reflection on the design	31
Limitations.....	32
Further studies	33
References	34
Appendix A.....	37
Appendix B.....	69
Appendix C.....	70

Abstract

A guided inquiry-based lesson series was designed regarding the life cycle analysis of chemical energy storage systems for pre-university, level vwo 5, for students aged 16-17. The design was based on action-oriented thinking and environmental literacy with an approach to develop products for education for sustainable development. The lesson series aimed to improve the capability to understand and communicate students' own and other's perspectives regarding complex sustainability topics such as sustainable energy storage. This pilot study interviewed chemistry teachers and tested a short walkthrough with five vwo 5 students. Results indicate that this pilot shows promise with improving sustainable development thinking in students. The lesson series itself was considered too long but was deemed engaging and relevant. Because of the prototypical nature of the lesson series, some adjustments must be made on the length, layout, and consistency. The

use of real-life authentic problems and data provided students with lesson content that they felt mattered.

Introduction

Sustainable Development

Currently society as a whole struggles with maintaining the wellbeing of its people whilst using the planet's resources in a sustainable way. Environmental sustainability is a prevalent term thrown around often without being bound to a clear definition. For this thesis, environmental sustainability is defined by Goodland (1995) as the maintenance of natural capital, where the output of natural resources should be equivalent to the input that can be regenerated, therefore producing a system that cannot be exhausted.

What aspects are relevant to environmental sustainability depends on the contemporary viewpoints as well as the stage of development of the nation addressing sustainable development. Currently, the most significant issue in environmental sustainability is climate change, whereas in recent history, ozone depletion was more topical. A characteristic of environmental sustainability is that these issues affect all nations, although in different manners. Some countries, however, are at a different stage of their development than others. This is important, as each nation will have their own unique issues to deal with. To create a global sustainable system, each country needs to address their own future growth and prosperity of their citizens. This challenge is named "sustainable development", which is defined by the United Nations Brundtland Commission (1987) as "Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs" (p. 41). Effective sustainable development requires coordinated actions from multiple levels of organization in order to create options in society that are sustainable. One of these actions is provided through (science) education, which can contribute to awareness of the need for sustainable development, as well as indicating the impacts and benefits of more sustainable alternatives.

Education can be a very effective way to help improve the level of sustainable development around the world, as it helps build competencies for younger generations to reflect on current and future complex environmental impacts from a local and global perspective (Little & Green, 2009). The United Nations has stated that education plays a central role in any sustainable development for our future (UNCED, 1998). It even declared 2005-2014 the 'decade of education for sustainable development' to implement Education for Sustainable Development (ESD) in formal education (UN General Assembly, 2019; UNCED, 1992). Educating people of the world on sustainable development is a significant, global effort, which requires both top-down educational policy changes, and bottom-up sustainability attitudes from schools and teachers.

Education for Sustainable Development

Education for Sustainable Development (ESD) is a holistic and multidisciplinary approach to education focusing on socio-scientific issues that emphasizes three interconnected aspects: society, environment, and economy (Venkataraman, 2009). According to Little & Green (2009), these three pillars contain a large part of our lives. To start, society includes the following: human rights, gender equity, peace, and human security. The economic pillar involves poverty and corporate accountability. Lastly, environment includes waste management and usage of resources (Little & Green, 2009). Some issues involve more than one of these pillars, such as climate change, migration, or human health. The key to ESD is to empower students to be able to make informed decisions, which is done through three important elements: (i) environmental literacy, (ii) action competence, and (iii) interdisciplinary thinking.

Environmental literacy in ESD

A key aspect of ESD is environmental literacy, which is defined by Kaya & Elster (2019) as: "knowing and understanding environmental issues; having attitudes, concerns, morals, and ethics towards the environment; having the ability and intention to act with environmentally responsible behavior; having the active involvement and social engagement related to the environment, as well as having skills to evaluate data and draw conclusions to form one's own opinion and collaboratively working

with stakeholders to solve environmental issues.” (p. 15). This definition is quite broad, so particular attention will be given to a specific facet of the definition: *having the skills to evaluate data and draw conclusions to form one’s own opinion.*

Action competence in ESD

ESD teachings need to be done in a way that provides students with the tools to enact change now and in the future, in both a holistic and pluralistic manner (Olsson et al., 2022). Students need to face action oriented and authentic problems in a democratic way to effectively teach ESD (Chen & Liu, 2020). Holism refers to the previously mentioned multidisciplinary approach of considering society, environment, and economy (Summers & Childs, 2007). Through the holistic lens, it is visible that social, cultural, and economic factors are often the cause of environmental problems and are strongly linked together. Pluralism refers to the enablement of students to participate in a collective approach where they can make well informed decisions regarding sustainability (Öhman and Östman, 2019; Olsson et al., 2022). Öhman and Östman (2019) explain pluralism as a democratic teaching method in which students can communicate and become aware of different concepts, perspectives, and interests of society. The concept of action competence takes these aspects of ESD and attempts to educate students into action-oriented individuals who understand how different choices can affect society (Hofman, 2015). A key aspect of action competence is that ESD content should be designed to include its holism and pluralism, which is attempted in the following research.

An action-oriented approach can enable students to understand and gain sufficient competence to make decisions and behavioral changes that facilitate sustainable development (Morgensen & Schnack, 2010). Morgensen & Schnack (2010) continue to say that action competence is an ideal that is strived for and not an end goal. These skills are therefore developed and continued to be improved so that sustainable development can be reached.

Implementing ESD and Its limitations

There has been more focus on ESD by various governments around the world (Mula & Milbury, 2011), but actual effective implementation in current (science) curricula has been lacking (Huckle & Wals, 2015; de Wolf & de Hamer, 2014). Some programs, like the Eco-schools, have implemented ESD strategies, yet also show that effective implementation is difficult to achieve. The Eco-School program is a school certification system that promotes ESD around the world through implementing pro-sustainability education. Eco-schools and their implementation of ESD provide insightful information into the efforts into education on sustainable development. The Foundation of Environmental Education, the organization behind Eco-Schools, created a standardized way to integrate ESD within schools. Unfortunately, it has not provided significant success in the extent of effective ESD implementation, as it fell short of their goal to produce continued pro-sustainability behavior after graduation in students (Boeve-de Pauw & van Petegem, 2017). These Eco schools have, however, paved the way to improve future implementation of ESD and serve as guidance of sustainability integration.

The Eco-schools program illustrates that effective implementation of ESD is a substantial and difficult task, and providing simple education on sustainability using classical methods does not successfully implement ESD correctly. Boeve-de Pauw & van Petegem (2017) argue is that in order to effectively implement ESD, it must include efforts to improve environmental literacy and action competence skills to the students. Much more research needs to be done to create an effective curriculum or school system that effectively educates students on sustainable development. The eco-school's approach takes a large, scale approach toward sustainability. In this research, a smaller scale attempt at ESD integration is made by improving education resource availability. By providing smaller scale ESD integration, more focus can be made into the building blocks of improving environmental literacy and action competence to develop student's environmental sustainability behaviors.

ESD in the curriculum

For effective ESD to be implemented, not just knowledge is required, but behavioral changes need to be made (Boeve-de Pauw & van Petegem, 2017). This means that ESD needs to be implemented through holistic education, which involves educating students in a multidisciplinary fashion, as ESD touches upon not just chemistry education, but all facets of our society.

Many teachers struggle to implement multidisciplinary education within their classrooms. This is because teachers often do not have all the required training and tools to cover every aspect (Hall & Weaver, 2001). This is therefore also an issue when implementing ESD within classrooms.

Additionally, many secondary school systems are set up in a way that is very segregated regarding different class subjects. Therefore, until more interdisciplinary education is possible, introduction of a new educational intervention, needs to fit within one subject area.

ESD needs to be integrated into current curricula, and this can only truly be done if all school subjects implement ESD. Many different viewpoints and approaches are used within ESD, and therefore every discipline within secondary education has a way to contribute to SD (Hofman, 2015).

ESD within chemistry class

By having multiple approaches utilized within ESD, we can ensure all facets of our lives are sustainable (Mckeown & Hopkins, 2003). According to Eilks & Rauch (2012) chemistry plays a significant role in ESD: “One of chemistry’s contributions to meeting the challenge of more sustainability in the development of our society is the promotion of a sustainable chemistry, in research and industrial production” (p. 57). Because designing both a whole school, or a chemistry curriculum is not within the scope of this thesis, it will focus on implementing ESD on a small scale, educational resource level.

Chemistry classes in secondary schools are often at the forefront of sustainability and environmentalism when dedicated courses in sustainability are not present. The chemistry curriculum of the Netherlands for example provides sustainability concepts such as the 12 principles

of green chemistry, pollution, sustainable production processes, and energy (College voor Toetsen en Examens, 2020). The approach of the Dutch national curriculum provides clear learning goals for sustainability but lack the holistic and behavior change based ideals that ESD provides. In order to further develop effective sustainability teaching, further integration of ESD can be beneficial for sustainability in chemistry.

Life Cycle Analysis as an Educational Tool for ESD in Chemistry Class

Implementing ESD into chemistry classrooms starts with producing educational resources dedicated to giving teachers the tools to provide effective ESD. Tolppanen et al. (2021) suggest using life cycle analysis (LCA) as a method of teaching sustainable development to students. Sustainability and the climate crisis are socio-scientific issues that involve complex variables and difficult to answer questions. Simplified and abstract concepts such as the 12 principles of green chemistry are straightforward enough to grasp to help think about sustainability in chemistry class, but when addressing real world examples, a wider scope and more holistic tools are required. One of these tools that is actively used is LCA.

LCAs are a standardized metric to assess the environmental impact of a product, process, or service along its life cycle (ISO, 2006). By quantifying relevant emissions and consumption of resources, and assessing the related social and environmental impacts, LCAs can give insights on the sustainability of products and services (JRC, 2010). By going through the process of a life cycle assessment using real world data, it can provide students with increased motivation, a broader range of perspectives, and improved pro-environmental attitudes (Juntunen & Aksela, 2013). Life cycle analysis is generally used within corporations and government agencies to assess their processes' impact on the environment. By providing insight of the process of making an LCA, it can also serve as a method to develop a way of thinking about various procedures and products in real-life and provide students with a holistic viewpoint by giving them the understanding of what a product requires in terms of

material costs and emissions. Life cycle analysis also requires real world data, which would expose students to making decisions about authentic, real-life problems and information.

In order to effectively introduce LCAs into a chemistry curriculum, a context is required to tie the life cycle analysis content to a chemistry concept. The context provided in this research project was the use of chemical energy storage systems such as batteries and fuel cells. There were several reasons for choosing this context for life cycle analysis. First, battery technology has become more popular and the demand for batteries is skyrocketing because of their necessity in electric cars, renewable energy storage, and wireless devices such as mobile phones (Xu et al., 2020). However, this increased demand comes at a considerable environmental cost (Peters et al., 2017). Additionally, batteries are a subject that is required by the national curriculum of the Netherlands and is often covered either in pre-university (also called vwo) secondary school in either the 5th or 6th year (College voor Toetsen en Examens, 2020, p. 21,30; Kerkstra et al., 2013, pp. 85–128; van Rhijn et al., 2015, pp. 86–106). By using batteries as a context for LCA education, the project provides a potentially engaging and relevant unit for students.

Argumentation to convey knowledge and understanding

By providing a sound argument, a person can convey their knowledge and opinions clearly to others. In sustainable development, there is often no clear-cut answer. In fact, sustainability can be so complex that a solution that works for one situation can be deleterious to another. When there is not a clear answer to a problem, one must use discourse to come to an answer. Von Aufschnaiter et al (2007) found a link between knowledge of science and students' argumentation ability. By including argumentation in teaching life cycle analysis, it will be possible to gain insight into the comprehension of sustainable development competencies such as environmental literacy and action competence. Through this basis, argumentation will be used as an assessment for the understanding of the students regarding life cycle thinking.

Argumentation also provides other benefits than assessing understanding. By using and learning how to argue their points, students can practice deductive/inductive reasoning, and provide scaffolding to create their own scientific arguments and evaluate others (Tsai, 2014). These increased scientific competencies, such as scientific literacy also helps develop student's competence in environmental literacy, since similar critical thinking is required. For this research, Toulmin's Model of Argumentation is used as the method of argumentation. This model serves as a simple, yet robust method for conveying opinions backed up by data (Toulmin, 2012).

Knowledge gaps

Research into ESD has been significant. Multiple studies on the efficacy of ESD or implementation of ESD have been made. In a review study, Ardoin et al., (2017) indicated that environmental education initiatives do have a positive or neutral effect, and that a holistic and interactive approach provided the most positive effects on knowledge and competencies. However, limited results are present for action-oriented skills, and behavioral changes regarding sustainable development. This is supported by a different review study by Jorgenson et al. (2019), who argue that current ESD and environmental education have not effectively implemented action-oriented education pedagogy. Action competence and action-oriented education is an essential tenet of ESD to provide students with clear understanding and tools to make sustainability focused decisions and behavior changes (Morgensen & Schnack, 2010).

According to Tolppanen et al. (2021), there have been a couple attempts at implementing LCA thinking in education. However, the amount of research on LCA in education is still very limited and needs to be expanded upon. The few research papers that have been published on LCA in education show promising results on improving action competence, scientific and environmental literacy, and student motivation. The guidelines from Tolppanen et al, (2021) serve as the primary approach toward designing the lesson plan used for this project. The six lesson-hour long set of lessons uses guidelines such as inquiry-based learning, multi-stakeholder approach, and a high proportion of

discussion and participatory decision making. Particular focus of life cycle analysis in the Dutch educational system shows that there has been little to no information or research done, especially within the context of batteries.

Research aims and questions.

This Master's thesis project aims to create a lesson series on the life cycle analysis of chemical energy storage systems for pre-university secondary school students (vwo 5, ages 16-17). By creating a socio-scientific inquiry-based life cycle analysis lesson series based on the key concepts of action-oriented thinking and environmental literacy, this lesson series aims to improve their capability to understand and communicate their own and other's perspectives regarding sustainability topics such as sustainable energy storage (see Appendix A). This study seeks to use the lesson series to assess the suitability of teaching life cycle thinking to pre-university secondary school students. Gathering data on action oriented ESD requires a longitudinal study on how student behavior is affected by the intervention. Because the scope of this study is significantly smaller, this master's thesis merely provides a pilot study on the potential that life cycle analysis may have in the Dutch education system.

This aim is broken down into four different research questions, based on the prototyping of educational interventions by Nieveen and Folmer (2013). The prototyping of Nieveen and Folmer (2013) breaks down the design of an educational product such as a lesson series in four stages: Design proposal, global design, partially detailed product, and completed product. The stage of the current design is considered a 'partially detailed product', this thesis serves as a the first step toward exploring if this series can provide effective ESD.

Two populations were interviewed for this study, and therefore these questions apply to both the perspectives of teachers and students.

- Is the lesson series consistent in its content, style, and format?

- Is the lesson series expected to effectively achieve its learning goals through effective educational methods? (See appendix B for the set of lesson goals)
- Is the lesson series expected to fit in a practical manner within Dutch vwo 5 education?
- Is the lesson series relevant to chemistry and sustainability?

Methods

The research project entailed three main steps: the design of the lesson series, the testing of the lesson series through walkthroughs & micro-evaluations, and the data analysis (Nieveen and Folmer, 2013; Boeije, 2009). Seeing as LCA teaching has not yet been thoroughly implemented and documented for secondary education, there is still much to learn about implementing an LCA-based lesson plan. This argues for a step-by-step design process where in-between feedback & reflection on the choices made by experts (teachers) and end users (students aged 17) is of importance. The testing focused on the research questions and was set up as a small-scale pilot study. Evaluation of a partially detailed product as outlined in Nieveen and Folmer (2013) is done through focus groups, walkthroughs, and micro-evaluations. For this research, use of a walkthrough and a micro-evaluation were used to determine the viability of the lesson series.

Design of the prototype lesson series.

A large portion of the design for the lesson series is based on Tolppanen et al., (2021). This is because they provide actionable guidelines towards introducing LCA concepts into secondary schools. In addition to this, mainstream data and products are used for specifications from a variety of sources. A significant section of design choices was also made with intuition and judgement calls based on previous experience and consultation with peers and the supervisor for this thesis. Within the design stage, the key concepts of ESD learning were explicitly considered:

Environmental literacy: The approach of the LCA section and final assignment of the lesson series is also rooted in a socio-scientific inquiry-based learning approach. Students are given an authentic

open question of “which of the three following chemical storage system is the most sustainable and sustainable in the Netherlands?”, along with the tools to analyze data through LCA. This lets them determine for themselves through fostering opinion forming and democratic citizenship (Knippels & van Harskamp, 2018).

Action-based learning: To enhance action, real-life data was extracted on energy storage systems so that students could experiment with creating their own insights. The data was extracted from Ecoinvent v 3.8 and was then worked backward by using the life cycle inventory of da Silva Lima et al., (2021). For educational purposes the numbers present in the database that is worked on by the students have been altered to aid with simplifying very complicated information so that secondary school students are able to work with the data.

For the final analysis, students were required to compare three chemical energy storage methods through the use of LCA data of various impact categories. These impact categories were chosen based on including not just environmental impacts, but also societal (such as human toxicity and water use) and economical (such as monetary costs).

ESD and life cycle thinking are both inherently multidisciplinary. This lesson series was designed to attempt to fit within the current Dutch pre-university curriculum, and therefore concessions had to be made on restricting the lesson design to focus mostly on chemistry and sustainability education.

The data provided for the LCA database document was sourced from real world emissions data. However, some numbers were altered and adjusted to simplify the process for the students, so that students would not get confused with the large amount of numbers required in the calculation of emissions data. Approximations of real-world recycling rates were also used to add data on recycling.

The lesson series design (see table 1) was an expansion from a previous bachelor’s thesis project created by another student. The previous project, focusing on a very similar concept: the life cycle of

batteries; was a short two lesson program that was expanded upon to create the more expanded six lesson program.

Excel document: Along with the lesson series is an Excel file that the students are tasked to work with during lesson 5 and 6. Through questions in the lesson series, the students are tasked to manipulate and process the data presented to them in this Excel worksheet. This was to get students acquainted with how LCA calculations are done.

Table 1: General lesson design of the lesson series on life cycle analysis

Lesson	Aim of the lesson	Major activities
1	Introduction, engagement, relevance, and revision of redox cell chemistry	Lead-in content, practical on creating a rechargeable battery
2	Relevance, chemical storage types	energy density, chemistry of different chemical storage types
3	Sustainability, sourcing, argumentation	Differences in battery materials, argumentation of sustainability worksheet
4	Introducing life cycle analysis	Breakdown of the stages of life cycle analysis: goal and scope, impact categories exercises inventory data exercises
5	Impact assessment, real world data usage	Excel worksheet data processing
6	Argumentation of sustainability through LCA data	Argumentation exercise using real world LCA data

Prototype Walkthrough

A small number of Dutch chemistry vwo 5 teachers (N=3) were individually interviewed (see appendix C) and walked through the partially detailed product. These semi-structured interviews focused on the expected effectiveness and practicality, relevance, and consistency of the partially detailed product. The interview scheme was first tested on an expert in science education for validation and to produce an initial coding scheme for data processing.

Prototype Micro-evaluation

A small pilot evaluation was deployed that provided some insights on the actual effectiveness, and the actual practicality of the partially detailed product through interviewing students, and the answers of worksheets. Time constraints prevented the micro-evaluation to be too elaborate, and therefore focused only on the final lesson, which involved students making arguments about which energy storage system was the most sustainable given the information received. The last lesson was chosen because it contained the final task of students evaluating which energy storage system was the most sustainable given their knowledge of life cycle analysis. The students (N=4) were carefully chosen based on a prior exposure to life cycle analysis and batteries through the smaller thesis project tested out previously. The micro-evaluation was undertaken at the Scala college in Alphen aan de Rijn.

The micro-evaluation involved a short refresher on what the students learned prior to the evaluation, along with the alterations that were made to the original bachelor student's lesson unit. These changes involved the different energy storage systems, an accelerated introduction to Toulmin's argumentation model, and expanding upon what they had already learned about impact categories. Students then followed a shortened version of lesson 6 in the lesson series. Following afterward there was a short interview on consistency, practicality, and effectiveness from the perspective of the students.

Data Collection and Analysis

Both the interviews for the micro-evaluation and the walkthrough were recorded and transcribed for collection, and the worksheet that was filled in by the students was handed in and collected as well.

In order to create a coding scheme, a professor in chemistry education was interviewed with the same interview scheme as the teacher walkthrough, this coding scheme was then verified with a master's thesis classmate. This data, along with Nieveen and Folmer's (2013) framework for educational design prototyping, was used to create the coding scheme used throughout the data processing. Some further selective coding was used to expand on the existing codes. A summary of the coding scheme used can be found in table 2.

Table 2: Coding scheme and examples

Category	Subcategory	Code from Teacher	Code from Student
Consistency	Changes in subject	Teacher Y expected further elaboration on the concept of LCA, but that did not come.	N/A
	Overarching consistency	Teacher E noted conversational language present in the series was not consistent	The students wanted an introduction at every lesson explaining what would be covered
Expected effectivity	Adoptability for teachers	All three teachers wanted a teacher guide outlining the expected prior knowledge of the students and other essential information	N/A
	Effectiveness in sustainability education	Teacher E noted that discussions on which energy storage method was the most sustainable would be difficult to do with an entire class	Students struggled to use the data deeper than on a superficial level
	Meeting Learning goals	Teacher A believed that this lesson series effectively shows students how a LCA can be used to assess the emissions and sustainability of a process or product.	Students pointed out that functional units were very hard to understand initially, but that the examples made it clearer.
Expected practicality	Suitability in Curriculum	Each of the three teachers raised concern about the lesson series being too long	Students preferred there to be a graded aspect.
	Time management	the consensus was that the first lesson would be difficult to finish within 50-minute sessions	N/A
	Usability	The teachers found that adding an introduction paragraph to each lesson can help make the material more digestible and usable.	Students said that they did not struggle too much with the content difficulty

Relevancy	Relevant in sustainability	Teacher E agreed that this was a good method of showing real world sustainability to students.	Students believe LCA could be a good subject to cover in the chapter of sustainability
	Evoking interest	Teacher E and Y strongly believe that the excel sheet and real-world data will keep students engaged very effectively	Students really enjoyed the practical aspect of the lesson series.
	Relevance of data	Teacher A thought that the use of the three different energy storage systems provided a good variety	N/A

Results

Through the framework of Plomp et al. (2013) the results will be divided into the coding scheme as seen on table 1. The results are further divided based on the population that was researched: students and teachers. Quotes used within this paper have been translated from Dutch into English.

Consistency

Changes in subject

Teachers

Generally, the consensus amongst participants was positive regarding the consistency of the educational product. The three teachers each believed that the topics introduced during the lesson series had good reason for being present within the lesson and that they were introduced in a logical sequence.

Teacher Y had the most commentary on the changes in subject throughout the lesson series. Her advice was that LCA's were not included early enough, and that references to LCA's were not elaborated on at the right time. Additionally, she found that sometimes new materials or concepts were introduced and felt out of place, for example when cobalt is introduced in page 17:

"The cobalt too, I was confused there. Reading the heading of cobalt, I thought, huh cobalt? The first sentence makes it clear again, but maybe you can call the heading differently there, 'other metals' or

what else is in a battery. Or maybe you say it's been mentioned before so that you couple it to something.” – Teacher Y

Overarching consistency

Teachers

They felt particularly positive about the persistent use of the same three battery storage systems throughout the lesson series, which provided an effective build-up.

There were, however, some sections that they each recommended adding additional transitional sections to make the changes flow better.

“You do not get brought through a story, there are good things in this lesson series, but it needs to come together more”. – Teacher Y

The sentiment was generally the same for this amongst the other two teachers as well.

Another bit of feedback that can improve the consistency of the lesson series is that in the current version of the lesson series, some parts were put in English. However, teacher E commented that even though the two 5 students all understand English proficiently, they will be removed from the immersion of the lesson and might not remember the concepts at the same level, therefore interrupting their flow through the lesson.

Teacher E also noted some formatting/layout issues and pointed out that some of the content on the side may not print out properly for everyone, depending on the margins of the printers.

Students

Of the brief time the students were able to look into the lesson series, they also felt it flowed nicely and had good topics. One thing they felt lacking was that there was not a solid introduction to the lessons.

“Because the structure in the lesson letter is good, but it does not really let us know what we will be working on then. There is nothing where it says, ‘you are going to do this’.” – Student 4

They felt that the introduction of the individual lessons required a summary as to what’s to come or the lesson goals that will be addressed so that they know what they can look forward to in the lesson.

Expected effectiveness

Adoptability for teachers

Teachers

One of the main takeaways of the interviews was that the lesson series was not particularly self-explanatory and requires additional guidance for a teacher to be able to adopt it into their classrooms. The nature of this lesson series is based on a socio-scientific issue that requires more specialized information that many chemistry teachers will not have been exposed to, extra explanation is needed to guide them effectively.

“I do think that you should include an accompanying teacher's manual for the teacher.” – Teacher A

Teacher Y also found that teaching argumentation was not within the scope of a chemistry teacher.

“I don't think I'm the right person to teach this. I would ask a Dutch teacher 'how do you learn argumentation?' And then maybe incorporate that. I would rather place this assignment with my colleague, and not with myself.” – Teacher Y

Effectivity in sustainability education

Teachers

In the final lesson, Teacher E did not think that having the entire class discuss the results together would be manageable or effective, and instead the use of expert groups would work better.

“I think having a discussion with an entire class is difficult, but I do like that role-playing what you actually have them do. So maybe what you can do is from 4 different roles Let's discuss together in smaller groups.” – Teacher E

Students

During the short micro-evaluation, the students had to fill in a worksheet to argue their stance on which energy storage system was the most sustainable. Each of the students came to the same conclusion and did so with relatively superficial reasoning. Each student counted how many times each energy storage system had the highest emissions per impact category and used that as their most contributing deciding factor. It was hoped that students would be capable of putting more or less weight into particular impact categories relative to another depending on their own priorities and that of the country they live in (for example, agricultural land usage in the Netherlands, where land surface space is very limited).

Ok well I wrote that I would go for the sodium salt. I find that average among all categories it performs the best. – Student 4

Yes, I agree, I also chose the molten salt for the same reasons. – Student 3

Yes, I have the same opinion. – Student 2

Meeting learning goals

Teachers

Teacher A felt that this lesson series does provide a comprehensive tutorial on how life cycle analysis is done, analyzed, and used to determine the emissions and sustainability of a process or product.

“I think so. I think all aspects of it come into play here. With this way, with LCAs. Raw materials, and how much is needed, what is required to source it. I think everything is included.” – Teacher A

The other teachers also agreed with teacher E, and teacher Y also mentioned that they thought it exhibited real world sustainability, and shows that it isn't always a clear answer, which they thought was good.

Students

The students underwent an accelerated version of the lesson series, based on the fact they had prior LCA experience. From the worksheet they undertook, it shows that they were capable of analyzing the data, whilst understanding the differences in batteries, to decide about which system is the best sustainability wise. However, this decision making was not very deep or complex. For example, one student indicated the following as their reasoning:

“The molten salt is the most sustainable relative to the other systems because on average they had the lowest emissions per indicator.”

In this case, the student did not consider that some impact categories (or indicators) may be more or less important to them or to implementation in the Netherlands, instead opting for an analysis where the student assumed each category as equally impactful for sustainability.

Expected Practicality

Suitability in curriculum

Teachers

A major issue that the teachers brought up is that the lesson series in its current form is much too long. They felt that six lessons on LCA is too much time dedicated to it, and that it would be near impossible to implement it into the Dutch education system. Despite the three teacher's issue with the length of the unit, teacher E and teacher A were very much in support of needing a product such as this, to educate students on life cycles and its analysis, because of its reflection of real life and to

give them tools to be able to become more environmentally literate, therefore a condensed, yet equally or more effective version could be more practical.

More issue regarding the implementation of such a unit, is that batteries tend to be covered during the first half of the final year of vwo secondary schools, and this lesson series is currently designed for vwo 5 students, as not to interfere significantly with 6th year exam year. Because of this, teacher Y said that she worries this would be a big repetition of a lot of content on batteries and fuel cells in the 6th year.

“If you do this in vwo 5, you're going to repeat it in vwo 6. Because the fuel cells will only come then, so that has already been explained. So, I wouldn't do that because it's not convenient.” – Teacher Y

Students

The students found that it was quite an extensive lesson series, and for it to fit within the vwo curriculum, they all agreed that it should have something of consequence, such as a grade, either through the worksheet they filled in, discussion, or something else.

“...but that it also has something to do with your grade, otherwise it's too long.” – Student 1

Time management

Teachers

When discussing timing and pacing of the individual lessons, the three teachers believed that lesson 1 and 2 were both quite densely packed, and that some content might need to be shortened, or at least there should be some indication of what content teachers can omit from their lesson. The remaining lessons the teachers had no comments on the amount of content per lesson.

“Especially for a school where 50 minutes is a lesson hour and so 50 minutes is very tight. Certainly, if you have a 20 minute lab that lab itself might not be a lot of work but the students have to put on their lab coats and so on. It's more than 20 minutes where they are doing so, I think it's a lot for a lesson.” – Teacher E

Usability

Teachers

Lesson 2 of the series did not contain sufficient interaction for the students, since it was mostly explanation of concepts, and a short video at the end about recycling. All three teachers suggested changing the lesson to be more interactive, by providing more questions or potentially something more hands on. Teacher Y even thought that in its current form, they would rather just skip lesson two altogether.

The teachers found the excel sheet included in the lesson series for lesson 5 & 6 to be hard to use and interpret without clear instruction for the teacher, and for the students. They admitted that they did not really attempt to because it seemed too daunting without guidance.

Teacher Y also commented on the final assignment of the lesson series where students had to assume a role and base their decisions on what energy storage was the most sustainable from a different perspective.

“Do they get something for that, or do they have to figure it out themselves what someone from that role thinks? Or do you give them something that allows them to empathize a bit about what a certain person has said, or what they think?” – Teacher Y

With this, teacher Y suggested including guidance to the students in the form of a short introduction paragraph per role.

The three teachers also agreed that there needs to be a clearer introduction of the lesson, both for students and for the teacher. This would increase the usability of the lesson series to them.

No significant issue was raised regarding the difficulty level of the lessons. Each teacher felt that the difficulty was adequate for a vwo 5 student.

Students

Students had no issue getting to work with the LCA data. They got started with the argumentation even after only a short introduction at it. This shows that ordinary students should not have major issues utilizing argumentation during a series of lessons such as these.

Additionally, the students found that the difficulty level of the content shown to them was easy enough to follow, but that redox was definitely required, implying that that was what challenged them the most out of this lesson series.

"I think the information in the lesson series is quite approachable..."

"... but we need to have done redox for this." – Student 4

Relevance

Current sustainability topics

Teachers

Each of the teachers had their own way of agreeing how this educational product provided relevant content for the students. Teacher E has some prior investment into LCA education and agreed that life cycle thinking, and analysis is a great method to have students bridge the gap between theoretical sustainability and real-world sustainable practices. Teacher A felt that schools often provide students with sustainability projects or weeks, but that they often stick to standard subjects such as reducing plastic waste. Teacher A indicated that a unit such as this provides a relevant and realistic method for students to compare the sustainability of products. The final teacher, teacher Y said that sustainability in the real world is a very loose term and can mean a variety of things. Giving students the tools to determine what is sustainable in the real world can give them better environmental literacy to make correct choices.

[regarding showing that sustainability is not clearly defined] "I think this helps with that. I think it would be interesting to focus on that." – Teacher Y

Each of the teachers found that the data and examples used in the lesson series to be relevant toward LCA education. However, teacher Y was not completely convinced that some of the subject matter in lesson 1-3 was necessary since the information was not used directly within the life cycle analysis sections.

Students

The students agreed that this could fit within the sustainability unit in their education. However, they did mention that because redox is required knowledge, that at their school the units would need to be shifted around.

“Yes, I think it fits with sustainability” – Student 3

Evoking interest

Teachers

At the start of the lesson series, both teacher A and teacher Y found it to be engaging and interesting for students. They found that starting out with a relevant topic to the world of students will catch their attention, as well as providing an interesting practical can give a boost to motivation and interest from students.

“I liked how you started. With the car, for example, you then take a step back afterwards. But it's a great introduction.” – Teacher E

“...and I think the practical is really cool.” – Teacher Y

Each of the teachers also appreciated how the whole lesson series comes together at the end, by using all that is taught from the batteries' characteristics to the LCA data to make an argument on sustainability.

“That circles around quite well. I think that's very nice.” – Teacher A

Students

The students were very engaged and enjoyed the graphs at the end of the micro-evaluation, which shows promise as an activating teaching approach.

“Well at least this [the graphs] was really fun” – Student 4

“Yes, it was interesting to be able to compare all the impacts” – Student 3

From the previous pilot done by the bachelor’s thesis, these students attempted to do the battery practical outlined on page 6-7 (Appendix A). They found the practical to be a lot of fun, which is also present in this version of the lesson series.

Relevance of data

Teachers

Each of the teachers thought that the three storage systems were chosen well, one that the students already know, the lithium-ion battery; one that was completely new to them, the molten salt battery; and the final one, which was functionally different, the hydrogen fuel cell. The teachers also said that the battery types, combined with the variety of data that they get from the LCA database provides students with captivating and real-world information to work with. Each of the teachers also found that the data and examples used in the lesson series to be relevant toward LCA education, and that the excel LCA walkthrough tutorial gave good insight into how to ascertain the sustainability of a product of process.

“Yes, I’ve done it before, that whole Excel work and data processing, they think that’s really cool.

That is also a strong part [of your lesson series].” – Teacher Y

Discussion and Conclusion

Through the feedback collected, the lesson series is not in a state to be effectively deployed yet. As this life cycle education intervention is still in the prototyping stage, there is a lot of space to do further research. This research project attempted to answer the four research questions below:

- Is the lesson series consistent in its content, style, and format?
- Is the lesson series expected to effectively achieve its learning goals through productive educational methods? (See appendix B for the set of lesson goals)
- Is the lesson series expected to fit in a practical manner within Dutch vwo 5 education?
- Is the lesson series relevant to chemistry and sustainability?

These research questions will be individually discussed.

Is the lesson series consistent in its content, style, and format (RQ1)

In general, the teachers and the students found that the lesson series was consistent in its content. There were however some sections that they each recommended adding additional transitional sections to make the changes flow better, in addition to adding a consistent introduction in the beginning to create a sense of clarity for both the students and the teachers.

An issue that was present was a lot of conversational language present in the lesson series. This was done to make the content feel more approachable for the students. However, this tone was not consistent within each of the lessons, and feedback even showed that it was not sufficient to tell a story within the lesson series. Therefore, in order to increase consistency, further engagement with conversational and approachable language should be used.

There was one other language issue that interfered with the consistency of the lesson series. There were sections that were taken from English sources, which were not translated to prevent mistranslation or interpretation issues. However, this inconsistency can indeed still cause interpretation issues for the students due to it being in a different language. Additionally, this can

remove them from the flow of the lesson, and not remember concepts at the same level as if it were taught fully in Dutch.

Some of the content (such as the practical) follow a slightly different layout and format than the rest of the lesson series. It would be better to align it with the rest of the lesson series to make it more consistent.

Outside of the aforementioned issues, the general consensus was that the lesson series was written in a consistent manner. One subject flowed to the next in a logical approach and directed the reader further toward the learning goals.

Is the lesson series expected to effectively achieve its learning goals through productive educational methods? (RQ2)

Overall, the feedback received showed that the lesson series effectively conveyed information on life cycle analysis, and that it had some success in giving students the tools to argue their stance on the sustainability of batteries.

Feedback suggested that a teacher manual can be highly effective. The manual can provide better transparency on which sections are essential for the lesson series, and which ones can be shortened/omitted from the lesson, in case there is insufficient time in the classroom. In addition to this, some explanations or elaboration can be provided exclusively for teachers, to give them better background knowledge, that is not necessary for the students to learn, but gives a teacher more tools to create an effective lesson.

During the interviews, a major point of advice was that it is better for students if they read the learning goals at the start of the lesson, along with a brief introduction. Both the teachers and the students voiced their preference over this. One issue, however, is that some of the lessons are already densely packed and adding on extra information at the start of the lesson can delay and/or

distract from the actual content, which limits the amount of information that can be added. The length and time requirements of the lesson series is already a significant constraint.

At the end of the lesson series, the plan was for the whole class to come together after approaching the problem from a different perspective in groups, and then discussing the sustainability of it together. Feedback suggested that this approach would be too chaotic, and that the more talkative students would be more likely to take part, leaving out more shy students. Instead of this, teacher E suggested using an expert group (or jigsaw) work format, which allows for discussion between each of the different perspectives in separate groups. The teacher can then go to each group to help guide them onward or correct any misunderstandings. This allows every student to participate because they each have information to share unique to the other group members.

During the micro evaluation with the vwo 5 students, the students had to fill in a worksheet on what battery system was the most sustainable according to them. The use of argumentation was not fully grasped within the time frame of the micro-evaluation. Students struggled to go deeper than superficial reasoning regarding impact categories and the extent of importance given their own, and a specific, context. This could be because students did not have sufficient guidance or instruction on argumentation, sufficient practice (since they only covered Toulmin's argumentation once, and at an advanced pace), or insufficient time to think about the impacts on a deeper level (they only had 10 minutes to make the argument). It could also be argued that they did not gain enough understanding of the extent each of these impacts has on the environment, society, and the economy. However, some superficial reasoning is expected due to time constraints and the complexity of life cycle analysis.

Is the lesson series expected to fit in a practical manner within Dutch vwo 5 education? (RQ3)

There are some significant issues regarding the expected practicality of a lesson series within the Dutch educational system in this lesson series. The length of the lesson series is a problem that needs to be addressed before this unit can be further researched.

The design of the lesson series was an expansion of a prior, short lesson series of 2 lessons. This 6-hour lesson series significantly expanded on the prior information, which is why it needed substantially more time. This, however, is an issue for the teachers, as they each indicated at multiple occasions that six lesson hours is a very long time period, and that it is impractical to add such a long unit into the current Dutch curriculum. One teacher suggested integrating two sections together, and only introducing the chemical storage system concepts as they are needed within the steps of the life cycle analysis. This could potentially decrease the total amount of time required, but deliberation will be required to ascertain if the restructuring is as effective in reaching the learning goals. The integration would trim down on explaining some of chemistry and characteristics of the batteries, and the examples provided can relate back to these batteries as well. This change is significant though, and one could argue that it would require a new pilot study to assess the effectiveness and practicality of the intervention. Another potential method of lowering time requirements is shifting the unit to vwo 6, after the unit about batteries. That way an LCA lesson can be a tag-along unit. This does come with some issues, however, due to it then needing to be shifted to the final exam year. During the exam year, more considerations should be made regarding practice and preparation for their national exams. Additionally, students are less likely to be interested in participating in a project that does not assist in their graduation.

Despite the length of the unit, multiple teachers expressed that this lesson series had good content and had good educational value for sustainability within the real world. The matter is engaging from

a context standpoint, and the students found the hands-on nature of analyzing the data enjoyable. This could mean that this approach has potential in providing interesting education for sustainability.

Is the lesson series relevant to chemistry and sustainability? (RQ4)

The relevance of the lesson series had to do with how relevant it was to sustainability, the students, and how relevant the data that was used is. Each of these aspects were deemed relevant to the lesson series. Teachers enjoyed the fact that the data used reflected the real world by the use of actual data from life cycle analysis databases and literature. Students also saw a unit like this having potential in one of their sustainability units in chemistry class.

There was some concern about argumentation not being within the scope of chemistry, however, even though teacher Y raised these concerns, they also thought it was important for students to be able to convey their opinions on sustainability, and therefore thought it was still important.

There was also mention of the relevance to the life of students. Teacher E noted that the start would be interesting for students as it draws them in from their own experiences with electric cars, phones, and such. This was the intent, and the design of the lesson series was meant to stay relevant to Dutch students.

Reflection on the design

The key findings and improvements that were indicated were that the contents of the lesson series were too long. There is a lot of focus on introducing the LCA through batteries. However, this can be cut down assuming that during redox chapters battery concepts are covered already. Therefore, the newly proposed change is to shorten the lesson series to a maximum of 4 lessons by removing the theory on batteries. An additional feedback given was that life cycle analysis does not get introduced early enough, therefore, a key change is that life cycle analysis theory could be introduced at the start, and covered throughout all of the lessons, instead of just the second half of the lesson series.

Lastly, key learning goals should be provided for each lesson at the start. See table 1 for a summary of the revised lesson design plan.

Table 3: Proposed potential alteration to the design of the lesson series, updated table from table 1

Lesson	Aim of the lesson	Major activities
1	Introduction of LCA, real world data, and three chemical energy storage systems	Breakdown of the stages of life cycle analysis Differences in battery materials and sources, differences in chemistry
2	Defining goal and scope, argumentation introduction	goal and scope, impact categories exercises inventory data exercises, argumentation exercise
3	Impact assessments, use real world data	Excel worksheet data processing
4	Argumentation of sustainability through LCA data	Argumentation exercise using real world LCA data

Limitations

The time constraint of the micro-evaluation was insufficiently long to provide information that was reliably accurate to the whole intervention. For a pilot study to give real and actionable information, the whole lesson series should be evaluated and tested instead of the short one-hour evaluation that was done. This data was sufficient to give an idea of the practicality and give some insights into the effectiveness of the lesson series. However, one cannot glean much information beyond the scope of what was addressed.

Two of the teachers have not received formal training or education on life cycle analysis, and therefore these teachers can provide limited content-based feedback on life cycle education.

However, this also provided an unbiased impression of the intervention and gives an insight into chemistry teachers that have also never been exposed to LCA education.

The interdisciplinarity of the content had to be limited so that the lesson series still fit well within a chemistry curriculum. If proper ESD is to be implemented, this should be addressed further.

Lastly, the data provided for students should be fact checked by an expert in the field, so that there is no question of misinformation or misleading data.

Further studies

Future studies can use the feedback given to adjust the LCA of energy storage systems lesson series to make it better fit within the Dutch educational system. After these adjustments are made, information can be gathered on the actual effectiveness and practicality. Future studies can assess to what extent action competence and/or environmental literacy are improved on. The lesson series can be tested within a full classroom, assessing whether the lesson series is adopted properly by a teacher within their class. Assessment of the students' understanding of life cycle thinking and environmental literacy improvement through their worksheets and assignments within lesson 3 and lesson 6 can also help provide information on the actual effectiveness.

Further studies can also provide grounds on increasing the interdisciplinarity of the subject by designing lesson series relating to life cycle thinking of the perspective of other class subjects, such as social studies, civics, economics, or other sciences. By creating a set of lesson series based on each relevant subject, an interconnected set of interventions can potentially provide ESD in a more comprehensive way.

References

- Ardoin, N. M., Bowers, A. W., Roth, N. W., & Holthuis, N. (2017). Environmental education and K-12 student outcomes: A review and analysis of research. *The Journal of Environmental Education*, 49(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/00958964.2017.1366155>
- Boeije, H. R. (2009). *Analysis in Qualitative Research* (1st ed.). SAGE Publications Ltd.
- Boeve-de Pauw, J., & van Petegem, P. (2017). Eco-school evaluation beyond labels: the impact of environmental policy, didactics and nature at school on student outcomes. *Environmental Education Research*, 24(9), 1250–1267. <https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1307327>
- Chen, S. Y., & Liu, S. Y. (2020). Developing Students' Action Competence for a Sustainable Future: A Review of Educational Research. *Sustainability*, 12(4), 1374. <https://doi.org/10.3390/su12041374>
- College voor Toetsen en Examens. (2020, July). *Scheikunde VWO syllabus centraal examen 2022* (No. 2). examenblad. https://www.examenblad.nl/examenstof/syllabus-2022-scheikunde-vwo/2022/vwo/f=/scheikunde_2_versie_vwo_2022.pdf
- Hall, P., & Weaver, L. (2001). Interdisciplinary education and teamwork: a long and winding road. *Medical Education*, 35(9), 867–875. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2923.2001.00919.x>
- Hofman, M. (2015). What is an Education for Sustainable Development Supposed to Achieve— A Question of What, How and Why. *Journal of Education for Sustainable Development*, 9(2), 213–228. <https://doi.org/10.1177/0973408215588255>
- ISO. (2006). *ISO 14040:2006(en)*. International Organization of Standardizations. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- Jorgenson, S. N., Stephens, J. C., & White, B. (2019). Environmental education in transition: A critical review of recent research on climate change and energy education. *The Journal of Environmental Education*, 50(3), 160–171. <https://doi.org/10.1080/00958964.2019.1604478>
- JRC. (2010). *General Guide to Life Cycle Assessment* (No. 1). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/38479>

- Juntunen, M., & Aksela, M. (2013). Life-Cycle Thinking in Inquiry-Based Sustainability Education – Effects on Students’ Attitudes towards Chemistry and Environmental Literacy. *Center for Educational Policy Studies Journal*, 3(2), 157–180. <https://doi.org/10.26529/cepsj.244>
- Kaya, V., & Elster, D. (2019). A Critical Consideration of Environmental Literacy: Concepts, Contexts, and Competencies. *Sustainability*, 11(6), 1581. <https://doi.org/10.3390/su11061581>
- Kerkstra, A., de Valk, T., de Valk, T., Lodewijks, T., Landa, I., & Schouten, J. (2013). *Nova*. Malmberg.
- Knippels, M. C., & van Harskamp, M. (2018). An educational sequence for implementing socio-scientific inquiry-based learning (SSIBL). *School Science Review*, 100(371), 46–52.
- Little, A. W., & Green, A. (2009). Successful globalisation, education and sustainable development. *International Journal of Educational Development*, 29(2), 166–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2008.09.011>
- Morgensen, F., & Schnack, K. (2010). The action competence approach and the ‘new’ discourses of education for sustainable development, competence and quality criteria. *Environmental Education Research*, 16(1), 59–74. <https://doi.org/10.1080/13504620903504032>
- Mula, L., & Milbury, D. (2011). *National Journeys 2011: Towards Education for Sustainable Development*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000192183>
- Nieveen, N., & Folmer, E. (Eds.). (2013). Educational Design Research. In *Formative Evaluation in Educational Design Research* (pp. 154–169). Netherlands Institute for Curriculum Development. <https://www.ida.liu.se/~961G29/matr/didaktik/edr.pdf#page=154>
- Öhman, J., & Ostman, L. (2019). *Sustainable Development Teaching: Different teaching traditions in environmental and sustainability education* (1st ed.) [EBook]. Routledge.
- Olsson, D., Gericke, N., & Boeve-de Pauw, J. (2022). The effectiveness of education for sustainable development revisited – a longitudinal study on secondary students’ action competence for sustainability. *Environmental Education Research*, 28(3), 405–429. <https://doi.org/10.1080/13504622.2022.2033170>

- Plomp, E. D., Nieveen, E. D., van den Akker, J., Bannan, B., Kelly, A. E., Gravemeijer, K., Cobb, P., & Folmer, E. (2013). *Educational Design Research*. Netherlands Institute for Curriculum Development.
- Summers, M., & Childs, A. (2007). Student science teachers' conceptions of sustainable development: an empirical study of three postgraduate training cohorts. *Research in Science & Technological Education*, 25(3), 307–327.
<https://doi.org/10.1080/02635140701535067>
- Tolppanen, S., Kärkkäinen, S., & Keinonen, T. (2021). Implementing Environmental and Societal Issues into Science Education through Life Cycle Assessment. *Science | Environment | Health*, 181–198. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75297-2_10
- Toulmin, S. E. (2012). *The Uses of Argument* (Updated edition). Cambridge University Press.
- United Nations. (1987, October). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. Oxford University Press. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>
- van Rhijn, J., Haadsma, P., Heutmekers, T., Rus, G., Spillane, B., & Veldema, Y. (2015). *Chemie Overal vwo 6* (4th ed.). Noordhoff.
- Venkataraman, B. (2009). Education for Sustainable Development. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 51(2), 8–10. <https://doi.org/10.3200/envt.51.2.08-10>
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 1(1).
<https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095->

Appendix A:

Levenscyclusanalyse van Chemische Energieopslagsystemen

Lesbrief

Gemaakt voor VWO 5 in Nederlands Onderwijs

Michiel van Grootel

25/05/2022

Masters Scriptie Science Education and Communication

Inhoud

Les 1: Introductie van Chemische energieopslag en Duurzaamheid	40
Wat is het verschil tussen Batterijen en Accu's?	41
Chemische energieopslag en redox, oh my!	41
Accu structuur	42
Half-cel:	42
Practicum: Nikkel-Ijzer Accu	43
Introductie:	43
Voorvragen:	43
Materiaal	44
Procedure	44
Vragen	45
Groene Energie en Opslag	45
Les 2: Het energienet en het opslaan van elektriciteit	46
Energieopslag:	47
Energiedichtheid:	47
Li-ion accu	48
Gesmolten zout accu (Molten Salt battery)	49
Solid-State Accu's	49
Brandstofcel	50
Efficiëntie	51
Recyclen van accu's	51
Lithium-ion accu recyclen – https://www.youtube.com/watch?v=6w78-aSTIDY)	52
Gesmolten natrium zout accu recycling	52
Waterstofcellen	52
Les 3: Argumentering en Duurzaamheid	53
Waar komen de componenten van accu's vandaan?	53
Lithium:	53
Kobalt:	54
Natrium en zwavel:	54
Waterstof:	54
Nikkel:	54
Toulmin's Model voor Argumentatie	54
Levenscyclusanalyse (LCA)	59

Wat is een LCA?	59
De stappen van een LCA	59
Stap 1: Goal and Scope.....	59
Cradle to gate.....	60
Cradle to grave.....	60
Cradle to cradle.....	60
Impact categorieën	60
Global Warming Potential (GWP)	60
Kg-equivalenten	61
Ozone Depletion Potential (ODP)	61
Human Toxicity Potential.....	61
Functional Unit	63
Functional Unit van een accu.....	63
Inventory analysis.....	64
Terug naar functional units.....	66
Het Rekenmodel.....	66
Het volledige LCA	67
Les 6:	68
Data-analyse.....	68
Learning goals	69
Lesson series:	69
Lesson 1:.....	69
Lesson 2:.....	69
Lesson 3:.....	70
Lesson 4:.....	70
Lesson 5:.....	70
Lesson 6:.....	70
Interview protocols (Dutch).....	72
Interview protocol teachers:.....	72
Begin:.....	72
Startende vragen:.....	72
Als ze nog niet de lesbrief hebben gelezen van tevoren	73
Vragen over de hele lesbrief	73
Vragen over de individuele lessen:	74

Les 1: Introductie van Chemische energieopslag en Duurzaamheid

Als het over chemische energie hebben, gaat het vaak het meest over batterijen en accu's. Accu's zijn tegenwoordig overal te vinden. In het klaslokaal alleen al bevinden zich snel meer dan tien batterijen. De afstandsbediening van de projector heeft waarschijnlijk twee AAA-batterijen erin zitten, en jullie telefoons en laptops hebben oplaadbare lithium batterijen. Alle auto's in de wereld hebben een accu, en de elektrische auto's hebben een enorme set van batterijcellen.

Je hebt vast wel gehoord van verschillende vormen batterijen zoals AA/AAA/B batterijen. De batterij in jouw telefoon heeft weer een andere vorm. Maar zijn ze ook chemisch anders? Wat voor verschillen zitten erin? Wellicht zijn er zelfs grote verschillen tussen de accu's gemaakt door twee concurrerende elektrische automakers?



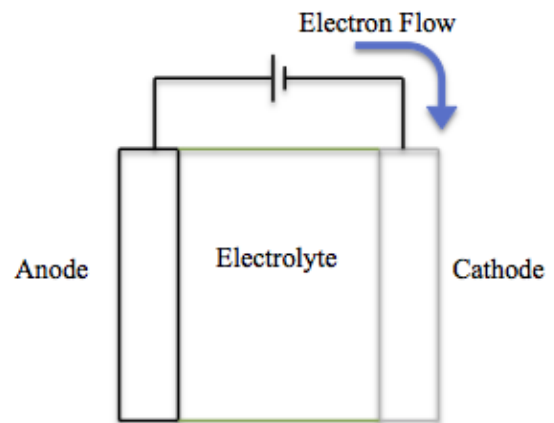
Figuur 1: twee automerken – Tesla model 3 links, en Kia EV6 rechts

Vraag 1:

- *Wat voor verschillen zijn er in batterijen in EVs? Waarom zijn er verschillen en maken die verschillen de ene auto beter dan de andere?*
- *Welke eigenschappen zijn het belangrijkste voor een elektrische auto?*

Ook voor telefoons zijn er verschillende batterijen. Een fabrikant wil misschien een kleiner apparaat, of een grote en krachtige telefoon, uiteindelijk wil elke concurrent natuurlijk één ding; dat hun batterij capaciteit het hoogste mogelijk is, zonder dat het te duur is om te maken, of te groot/zwaar wordt.

Batterijen en accu's worden gebruikt als er energie opgeslagen moet worden. Batterijen werken door het gebruik van chemische energie. Een cel is gemaakt uit twee elektrodes, met een elektrolyt ertussen. De twee elektrodes kunnen dan met een kabel elektronen laten stromen. Als je er iets tussen zet, zoals een LED-lampje, dan wordt de elektriciteit gebruikt.



Figuur 2: Simpele accudiagram

Sommige batterijen hebben een zoutbrug nodig, dit is omdat de elektrolyt van de kathode anders moet zijn dan de anode. Deze zoutbrug laat ionen doorstromen, maar laat de twee elektrolyten niet mixen.

Vraag 2:

- *Van hoeveel batterijen ben jij de eigenaar? Weet je ook van iedere batterij wat voor soort het is?*

Wat is het verschil tussen Batterijen en Accu's?

Vaak worden batterijen en accu's voor hetzelfde concept gebruikt. Dit is voor het merendeel waar, en er zijn verschillende scheidingen tussen de twee woorden. Vaak wordt het onderscheid door de vorm van de elektrochemische cel, en/of dat ze oplaadbaar zijn of niet. Een batterij heeft standaardvormen (AA, AAA, C, D), en een accu niet. Tijdens deze lessenserie wordt er niet echt een onderscheid gemaakt, behalve voor grootschalig energieopslag, dan gaat het over accu's.

Chemische energieopslag en redox, oh my!

Niet alle batterijen kunnen opgeladen worden. Maar dit is natuurlijk wel een handige eigenschap om te hebben als het over energieopslag gaat, we willen onze opslagmethode meer dan één keer gebruiken, en liefst zo vaak mogelijk! Accu's die oplaadbaar zijn, zijn chemisch wel anders dan niet oplaadbare accu's

Accu's werken door redoxreacties, dit is iets waar je dit jaar al over gehad hebt, maar redox ga je heel veel in je toekomstige scheikunde gebruiken (netzoals nu), dus het doet geen kwaad om het weer te discussiëren. Accu's kan je vaak weer opladen, als de celenergie ontleedt, gaat de redox een kant op, en als het wordt geladen, gaat de redox de andere kant op. Sommige accu's zijn niet oplaadbaar, want de redox chemie is niet omkeerbaar.

Met het gebruik van redox chemie, gaan we eerst wél naar een niet-oplaadbare accu's kijken, om wat conceptuele aspecten te benaderen.

Opdracht 3: Wijs aan welk stof wordt geoxideerd, en welk stof wordt gereduceerd.

- I. $2\text{Fe}^{2+} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 2\text{Br}^-$
- II. $\text{MnO}_2 + 2\text{Mg}(s) \rightarrow 2\text{MgO} + \text{Mn}$
- III. $\text{HgO} + \text{Zn} \rightarrow \text{Hg} + \text{ZnO}$

Accu structuur

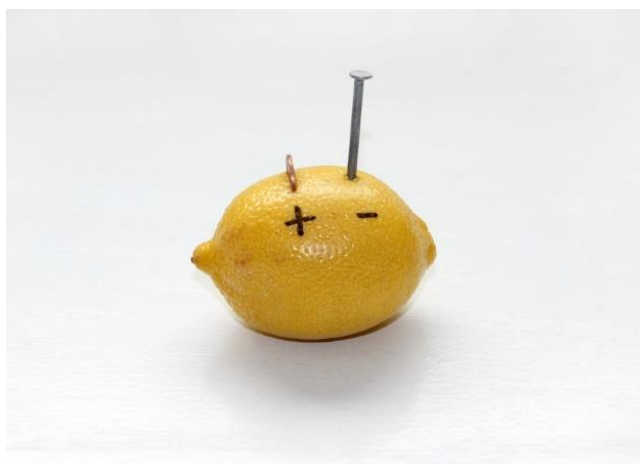
De structuur van een accu kan redelijk verschillen, maar het concept blijft hetzelfde. Een cel heeft een elektrode aan een kant met een stof waar een reductie kan gebeuren (kathode), en aan de andere kant een elektrode waar oxidatie (anode) gebeurt. Tussenin is een elektrolytoplossing. Dit wordt meer helder tijdens het practicum, waar jullie zelf een accu gaan maken. Dus een accu heeft drie componenten nodig, een oxiderende half-cel, een reducerende half-cel, en een elektrolyt.

Half-cel:

Een half cel is een kant van een elektrochemische cel. Dus wat er gebeurt in een van de twee elektrodes. De half cel reactie voor ijzer(II) naar ijzer(III) ion is bijvoorbeeld $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{e}^-$. Voor magnesium(II) naar metalig magnesium is de half cel reactie $\text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}(s)$. Als je de twee half cellen samenvoegt krijg je de volle redoxreactie: $\text{Mg}^{2+} + 2\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Mg}(s) + 2\text{Fe}^{3+}$

Voorbeeld 1:

Een simpele batterij kan gemaakt worden met een citroen, een verzinkte spijker, en een koperen munt (zie figuur 3). Als je de munt en de spijker met een draad naar een lampje of klok koppelt dan gaat hij werken! Dit gebeurt omdat er een redoxreactie gebeurt tussen de zink en koper. Het zink oxideert naar zink(II), en lost op in de elektrolyt. Tegelijkertijd komen er elektronen vrij en die gaan door de draad naar de andere elektrode. De elektronen die aankomen bij de kathode nemen de H^+ ionen en worden waterstofgas.



Figuur 3: het zink komt van de verzinkte spijker (verzinkt betekent dat er een beschermend laag van zink over de ijzere spijker zit), en de koper komt van de Amerikaanse munt. Source: <https://lobestir.com/2013/01/14/lemon-batteries/>

Vraag 4: Beantwoord de volgende vragen

- Wat is de elektrolyt in een citroen?
(hint: het moet een oplossing zijn die al in de citroen zit)
- Wat zijn de half-cel reacties van de citroen batterij? (hint: de elektrolyt speelt hier een rol)
- Welke half cel reacties horen bij welke elektrode?
- Wat is de totaalreactie?

- *Waarom is deze batterij niet oplaadbaar?*

Om een beetje meer praktische ervaring te krijgen, gaan we nu onze eigen oplaadbare batterijen maken.

Practicum: Nikkel-Ijzer Accu

Introductie:

Accu's gemaakt van Nikkel bestaan al redelijk lang. Voordat lithium-accu's populair werden, waren nikkel accu's de koning van oplaadbare batterijen. Eerst waren er Ni-Cd batterijen, maar die waren niet zo gezond door het gebruik van cadmium. Na de Ni-Cd batterijen kwam er nikkel-metaal hydride accu's, deze hebben meer energiedichtheid en zijn minder giftig. Tegenwoordig zijn deze batterijen voor het merendeel vervangen door Lithium ion accu's, maar ze worden nog steeds wel gebruikt.

Vandaag gaan we zelf een accu maken. In dit practicum maken wij een Nikkel-metaal accu, met ijzer als onze metaal anode. Deze accu werkt ongeveer hetzelfde als een nikkel-metaal hydride, ook NiMH genoemd, die veel vaker voorkomt dan een NiFe accu. Ze gebruiken de generieke 'M' in NiMH omdat het allerlei soorten metalen kunnen zijn, en is vaak zelfs een legering van verschillende metalen zoals V, Ti, Zr, Ni, Cr, Co, en Fe.

Samen gaan we deze accu opladen en kijken we of we een LED-lampje kunnen laten branden met de accu.

Voorvragen:

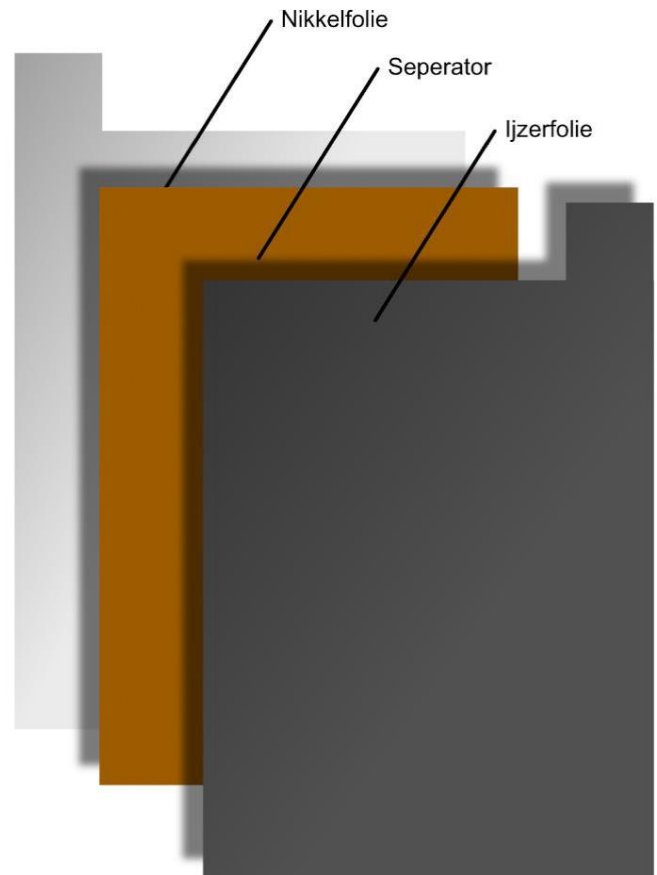
1. Tijdens het maken van de NiFe accu, stoppen we een separator tussen de nikkel en ijzer. Waarom mogen de nikkel- en ijzerfolie elkaar niet aanraken?
2. Tijdens het ontladen van de accu, is er een reductie van NiOOH (Ni(III) \rightarrow Ni(II)) en de oxidatie van ijzer (Fe(s) \rightarrow Fe(II)). Wat is de standaard electrode potentiaal voor de twee half cel reacties, en wat is de volledige voltage van deze redoxreactie? (Hint: gebruik je BiNaS boekje hiervoor)

Materiaal

- Petrischaaltje
- Nikkelfolie
- Filterpapier
- Ijzerfolie
- Kabel klemmen
- LED-lamp
- Labvoeding
- Kaliumhydroxide (KOH-oplossing) 1M
- Bekerglas water.
- Stopwatch of timer

Procedure

1. In dit practicum moet je handschoenen en een laboratoriumjas aan doen en een veiligheidsbril dragen.
2. Leg in het Petri schaalpje het nikkelfolie neer, vouw het op zodat er een tab is waar je een klem kan mee aanbrengen, leg hierop het filterpapier
3. Doordrenk dit in de KOH-oplossing
4. Leg hier het ijzerfolie op.
 - Pas op! Het **ijzerfolie en het nikkel** mogen elkaar **niet aanraken**, anders werkt hij niet!
 - De batterij kan verschuiven, dus je kan het bekglas met water op de stapel zetten om het stil te houden
 - Beantwoord vraag 1 en 2
5. Zet je voeding op 3 volt, en verbind de elektrodes met de juiste draden. Wacht vervolgens ongeveer 1 minuut. Let goed op!
 - Kijk naar vraag 3 en 4, en probeer ze te antwoorden
6. Pak je LED-lampje en houd ze tegen de elektrodes aan. Brandt de LED nu?
7. Meet wat de voltage de cel levert met je voltmeter
 - Beantwoord vraag 5
8. We hebben nog een cel nodig om de LED-lampje te laten branden. Volg stap 2 t/m 4 nog een keertje



9. Verbind de positieve elektrode van de eerste cel aan de negatieve elektrode van de andere cel
10. Laad deze twee cellen tegelijkertijd op met de overgebleven elektrodes, deze keer heb je 5 volt nodig,
11. Wacht wederom 1 minuut, koppel de accu los van de voeding, en sluit de LED-lampje aan. Als het lampje nu aan het branden is, gebruik de timer om te zien hoe lang het licht uitstraalt
12. Als je LED niet brandt, heb je misschien iets verkeerd om aangesloten.... Geen zorgen, je batterij gaat niet kapot van verkeerd om laden.
 - Beantwoord de resterende vragen

Vragen

1. Welk materiaal is de positieve electrode tijdens het gebruiken van de accu, en welk materiaal is de negatieve electrode?
2. Op welke manier sluit je nu de elektrodes aan tijdens het opladen?
3. Wat zie je nu gebeuren? Welk gas, of welk gasmengsel ontstaat er in de batterij?
4. Waarom zou dit voor de batterij in bijvoorbeeld een auto een probleem kunnen opleveren?
5. Zoek uit hoeveel volt een rode LED nodig heeft om te gaan branden. Hoeveel batterijcellen zijn er nodig om de LED te laten branden?
6. Hoelang bleef de LED de eerste test branden?
7. Hoelang blijft de LED na 6 keer opladen en ontladen branden?

Groene Energie en Opslag

Klimaatverandering is een heel belangrijk onderwerp, en we moeten als een maatschappij zo veel mogelijk doen om onze uitstotingen te verminderen. De logische stap is natuurlijk over te stappen naar duurzame energie zoals wind- en zonne-energie. Dit is makkelijker gezegd dan gedaan.

Gedurende de dag, is er een variabel gebruik van aanwezige energie: tijdens de dag zijn mensen bezig met van alles, en dat gebruikt veel energie. s'Nachts daarentegen is er nog steeds elektriciteit nodig maar een stuk minder. Zo zijn er elke dag meerdere pieken en dalen, en de energieopwekkingsindustrie moet hiervoor precies de correcte energie leveren. Dit is makkelijk te doen met elektriciteit die van olie of aardgas komt, omdat je die makkelijk kan toepassen. Maar ja, die kunnen we niet blijven gebruiken vanwege klimaatverandering. Als het energienet de vraag niet kan bijhouden, krijg je elektriciteit storting of uitval. In ons moderne leven gebeurt dit niet vaak, maar wat gebeurt er als we ons energiesysteem omzetten naar groene energie?

Opdracht 5: Discussieer met je klasgenoten:

Stel je voor. We zijn als Nederlanders volledig naar groene energie overgestapt. Het probleem is nu dat er regelmatig elektriciteit uitval is. Om energie te besparen is het nodig dat je af en toe een dag hebt zonder elektriciteit.

- Het is een schooldag, hoe is je dag anders als de elektriciteit uit is?
- Hoe veel keer in de week is dit acceptabel als het betekent dat we hiermee tegen klimaatverandering kunnen strijden?

Les 2: Het energienet en het opslaan van elektriciteit

Twee van de meest besproken groene energiewekking methoden zijn wind- en zonenergie.

Tegenwoordig zie je overal op de daken van huizen zonnepanelen en in veel van Nederland kan je windmolens zien. Zie je al problemen met deze twee energiebronnen?

Ondanks dat de wind altijd lijkt te waaien, is dat niet het geval. Als er niet genoeg, of te veel wind is, moeten de windturbines uit, en dan genereren ze geen elektriciteit. Hetzelfde gebeurt natuurlijk met zonnepanelen. Als de zon onder gaat, wekken ze niks op, maar elektriciteit is nog wel nodig!

We hebben betrouwbare energiebronnen nodig om ons energienetwerk in stand te houden. Soms is er te veel energie als de zon fel schijnt en de wind hard blaast, en soms is er veel te weinig energie als het bewolkt is zonder wind. Als er te weinig elektriciteit is, zullen er meerdere plekken zijn met black-outs.



Figuur 4: Zonnepanelen op een dak

Vraag 6:

Wat voor manieren zijn er om de energienet meer betrouwbaar te maken samen met groene energie?

Energieopslag:

Er bestaan al redelijk wat manieren van energieopslag. Twee groepen van energieopslag zijn er: chemisch, en fysiek. Fysieke manieren zijn bijvoorbeeld waterpompen, waar je water naar boven pompt in een reservoir; en perslucht, waar ze heel veel lucht in een grote ruimte pompen op een hele hoge druk, die ze later weer kunnen gebruiken om elektriciteit te wekken. De andere manier is onze focus voor deze lessenserie: chemisch. Chemische energieopslag gebeurt voornamelijk met accu's, maar brandstofcellen worden ook vaak gebruikt. Er zijn meerdere methodes, en elk methode heeft allerlei soorten. Wat is nou het beste? Het moet natuurlijk efficiënt en goedkoop zijn, en alsnog een hoge capaciteit hebben. Naast de performance van de energieopslagmethodes, moeten we het ook natuurlijk over duurzaamheid hebben. Want tja, wat is nou het nut om groene energie op te slaan als het opslaan slecht voor het milieu is? Om naar de duurzaamheid te kijken van een product, gebruiken men een levenscyclusanalyse, oftewel LCA genoemd.

Als het over grootschalig energieopslag gaat, zijn er niet heel veel opties voor accu's. Voor deze behoefte heb je accu's nodig die oplaadbaar zijn, met een hoge capaciteit, en die een lang levensduur hebben. Daarom worden de volgende soorten accu's vaak gebruikt voor energieopslag: lithium ion, flow accu's, en gesmolten natrium zout accu's.

Energiedichtheid:

De definitie van energiedichtheid is de hoeveelheid energie dat opgeslagen is in een systeem. Voor accu's worden ze vaak berekend via massa, maar soms wordt volume ook gebruikt. Hoe hoger de energiedichtheid van een accu, hoe meer elektriciteit opgeslagen kan worden in hetzelfde volume of massa.

$$E_d = \frac{E}{V} \text{ (kWhm}^{-3}\text{) of } E_d = \frac{E}{m} \text{ (kWhkg}^{-1}\text{)}$$

Vraag 7: gebruik tabel 1 hieronder, beantwoord de volgende vragen:

- Bereken de energiedichtheid van de loodcelaccu in en de lithium powerbank in Wh/g.
- Een Renault ZOË uit 2020 heeft een lithium-accu van 52 kWh. De accucellen die hierin gebruikt worden zijn dezelfde als die in veel powerbanks, alleen gebruikt de auto er veel meer. Dit accu pack weegt 206kg. Hoeveel kg zou een vergelijkbaar formaat accu wegen, als het een loodaccu zou zijn? Ga uit van je antwoord bij vraag 1.

	Lood-zuur accu	Litium ion accu
Afmeting	181,5 x 77 x 167,5 mm	119 x 66 x 12 mm
Capaciteit (10 uur)	20.000 mAh	5.000 mAh
Gewicht	6.100 g	125 g
Merk	Ultracell UCG-20-12	SP power
Spanning	12 V	5 V
Systeem	Loodgel	LiPo

Tabel 1: twee soorten accus (lood-zuur accu en Li-ion accu)

Li-ion accu

Bijna iedereen heeft een van deze accu's bij de hand. Zo'n beetje alle telefoons hebben een lithium ion accu. Dit komt omdat zover heeft de lithium ion accu het hoogste energiedichtheid dat commercieel beschikbaar is. Ze zijn daarom ideaal voor mobiele elektronica omdat zoals telefoons, laptops en elektrische auto's. Wat wel tegenvalt is hoe duur ze zijn, lithium en kobalt, wat veel gebruikt wordt in deze soorten accu's zijn niet goedkoop en is niet makkelijk om te verwerven.

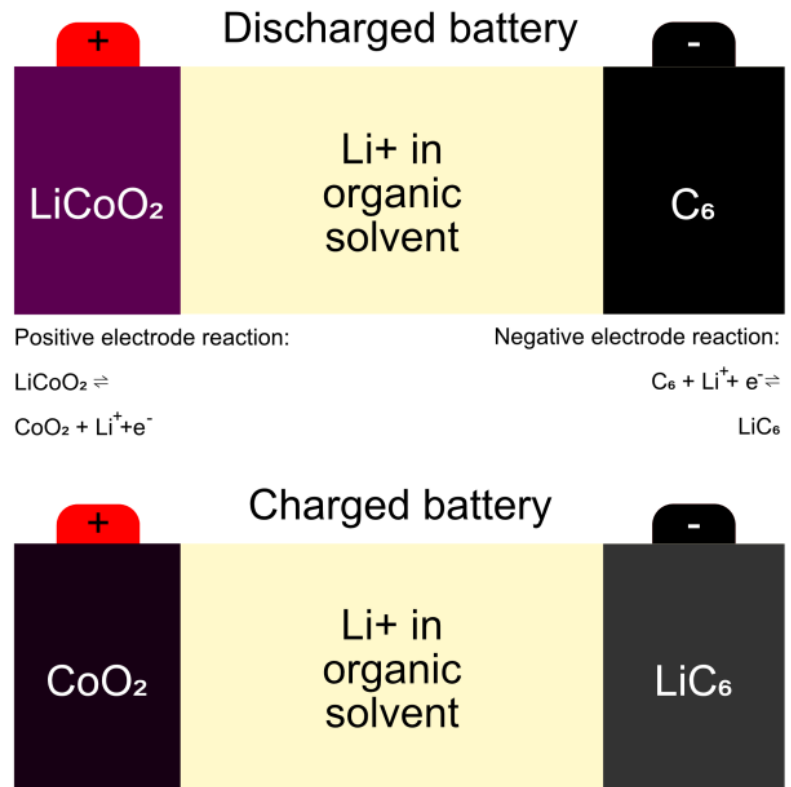
Deze accu's werken anders dan een NiMH accu, want metallisch lithium is zeer onstabiel, en kan daarom niet makkelijk een elektrode zijn. In plaats van een metallisch elektrode, gebruiken ze grafiet in lithium ion accu's.

In figuur 5 zie je de twee staten van een lithium-kobalt oxide accu, en de half cel reacties.

Als een lithiumaccu opgeladen wordt, verandert CoO_2 naar CoO_2 , en het lithium lost op. Deze lithiumionen naar het grafiet en intercaleert met C_6 en wordt LiC_6 .

Vraag 8:

- Li-ion accu's zijn fantastisch voor beweegbare toepassingen, maar is hoge energiedichtheid even belangrijk voor energieopslag voor stilstaande toepassingen?
- Wat zijn de belangrijkste eigenschappen voor grootschalig energieopslag?



Figuur 5: simpel diagram van een li-ion batterij

Gesmolten zout accu (Molten Salt battery)

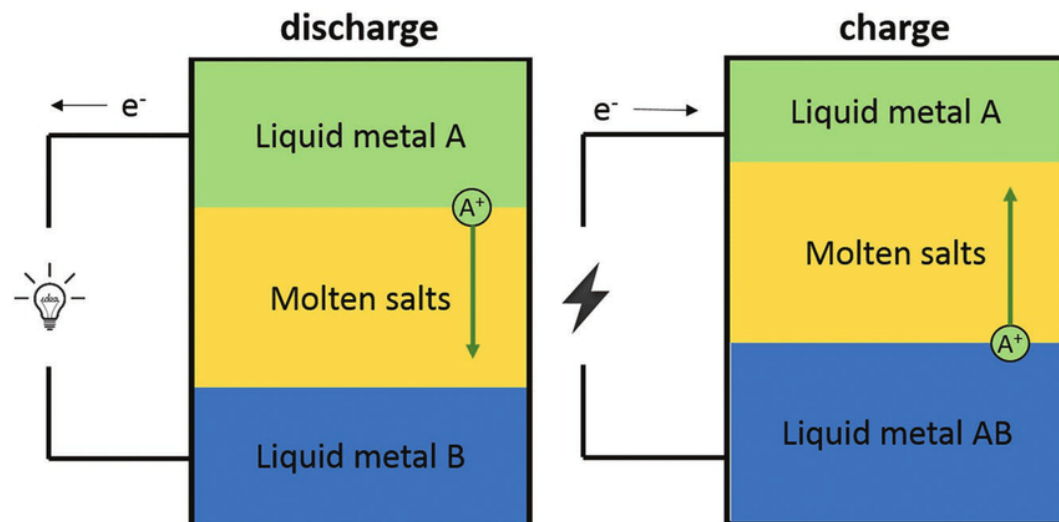
Dit soort accu's gebruikt zout die gesmolten is zodat het vloeibaar is. De elektrolyt is NaCl , NaNi-Cl , of NaS zout. Omdat deze zouten niet vloeibaar zijn moeten ze verwarmd worden tussen 200°C en 350°C voordat ze kunnen werken. Ondanks dat het een hoge gebruikstemperatuur heeft, is het voordeel hier dat het materiaal dat gebruikt wordt redelijk overvloedig is vergeleken met metalen zoals lithium en kobalt.

In dit systeem zijn de elektrodes en de elektrolyt allemaal een vloeistof, dus soms moeten ze met een membraan gescheiden zijn, maar voor sommige versies van de accu, zijn de metalen niet mengbaar, en dus blijven ze gescheiden.

Solid-State Accu's

Verdacht als de volgende generatie van accu's. Deze accu's beloven om de groten nadelen van Li-ion accu's te vermijden. Nog een voordeel is dat theoretisch gezien hebben solid-state accu's nog meer energiedichtheid dan li-ion accu's. Het probleem is dat de technologie is al sinds 1978 onder onderzoek staat. Daarom denken bedrijven zoals Tesla dat het maar een droom is, en dat het nooit zal lukken.

Maar na 40 jaar van ontwikkeling, is er een bedrijf die het commercieel maakt. Toyota gaat hun hybride solid-state accu auto verkopen in 2025. Solid-state accu's zijn anders dan andere accu's omdat het geen vloeibare elektrolyt heeft, maar een solide.



Figuur 6: Voorbeeld diagram van een gesmolten zout accu

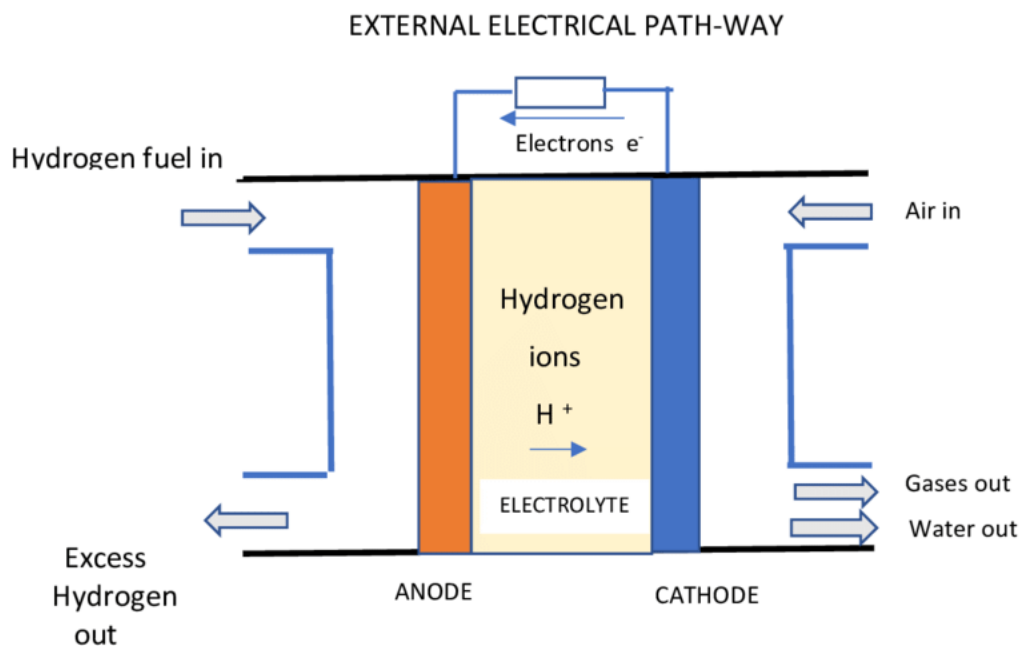
Brandstofcel

Het is geen accu, maar brandstofcellen gebruiken ook chemische energie om elektriciteit op te wekken. De meest veelbelovende soort brandstofcel zijn waterstofcellen. Waterstofcellen bestaan al bijna 200 jaar, en worden nog steeds vaak gebruikt. De waterstof gaat van de opslagtank naar de anode van de cel, waar ze geoxideerd worden naar protonen (H^+). De protonen kunnen door een membraan in de cel door terwijl de elektronen door het circuit gaan en elektriciteit opwekken. De elektronen arriveren bij de kathode, waar zuurstof van de lucht ze accepteren. De zuurstof wordt dan oxide. De protonen en oxide vormen dan samen water en maakt hitte los. Deze hitte kan dan ook weer gebruikt worden om meer elektriciteit op te wekken.

Vraag 9:

- Wat zijn de half-cel reacties van waterstof en zuurstof?
- Is dit duurzaam?
- Hoe kunnen we weer meer waterstof krijgen? Noem het proces.

Waterstofcellen zijn fantastisch voor energieopslag. Ze hebben een hoge capaciteit, want waterstof heeft de hoogste specifieke energie van alle brandstoffen (per massa) die bestaan. Waterstof ook is overal, het is namelijk het meest voorkomende element in het universum. Het probleem is dat waterstof een hele lage dichtheid heeft, het is namelijk een heel licht gas. Daarom moet je speciale opslagtanks hebben die onder redelijke hoge druk staat. Waar accu's het voordeel heeft is dat ze meer efficiënt zijn. Op het moment zijn accu's ongeveer 80% energie efficiënt, en waterstofcellen zijn tussen de 40-60% energie efficiënt. Maar theoretisch gezien kunnen waterstofcellen 100% efficiënt worden. Omdat er geen CO_2 uitstotingen zijn, is dit een redelijke duurzame optie.



Figuur 7: waterstofcel

Efficiëntie

Niks is 100% perfect, alles wat we doen heeft inefficiënties, en dat geldt ook voor accu's. Elke keer dat je een accu oplaadt, stop je er meer energie in dat je tijdens het ontladen eruit krijgt. Dit kan gebeuren door bijvoorbeeld imperfecties, chemische nevenreacties, en thermisch energieverlies.

In de volgende tabel zie je de verschillende efficiëntie van accu's en brandstofcellen.

	Li-ion	gesmolten NaS	waterstofcel
Coulombic efficiëntie	99,7	87	65
Energiedichtheid (in Wh kg⁻¹)	120-260	90-150	~33600

Tabel 2: de efficiëntie van verschillende opslagmethodes

Recyclen van accu's

Een grote stap van duurzaamheid is natuurlijk hergebruik en recycling. Recyclen klinkt wel simpel, zoals voor bierflessen, die kunnen gewoon gewassen worden en dan weer gebruikt worden. Maar meer complexe producten zoals accu's zijn moeilijker om te recyclen.

Er zijn meerdere metalen, en als hun levenscyclus aan het eind is, dan zijn deze metalen en chemicaliën vaak niet zo makkelijk om uit elkaar te halen. Natuurlijk voor het practicum dat jullie gister probeerde, kan je makkelijk de twee folies uit het schaalpje halen. Maar als het over duizenden accu's tegelijkertijd hebt, dan kost dat te veel tijd.

Soms is er een keuze qua wat je wel en niet kan recycle. Als je een metaal eruit haalt kan het te duur zijn om de andere metaal er ook uit te recyclen. Kijk bijvoorbeeld naar je NiFe accu. Als je een keuze zou moeten maken tussen ijzer en nikkel, dan is het best om voor het nikkel te kiezen, want ijzer is er genoeg van, en nikkel is iets moeilijker te mijnen. Je kan bijvoorbeeld een snelle en goedkope manier ijzer uit een accurecyclingslurry krijgen met een mix van zwavelzuur en CaCO_3 , maar dan wordt de nikkel NiCO_3 , die niet zo goedkoop om uit je recycling slurry is te krijgen. Processen gaat dus niet altijd alleen maar om of het kan, maar ok over hoe makkelijk of goedkoop het kan. Als het namelijk heel duur is, gaan producenten liever naar de mijnbouw.

Lithium-ion accu recyclen – <https://www.youtube.com/watch?v=6w78-aSTIDY>

Voor je huishoudelijk afval, scheid je je afval vaak. En dat geldt ook voor accu's, die moeten vaak in een speciale bak worden gedeponeerd. Elk accusysteem heeft een andere manier van recycling, maar voor lithium-ion accu's zit het ongeveer zo in elkaar:

- Accu's worden gecheckt en wordt volledig ontladen (zodat de chemie allemaal in hetzelfde staat is)
- Accupack is uit elkaar gehaald
- Materialen worden dan gebroken, gesorteerd en gezeefd. In sommige speciale gevallen gebeurt er ook thermo mechanische scheiding (een mix van het gebruik van warmte en fysieke scheiding manieren)
- Hydrometallurgische en pyrometallurgische methodes (het gebruik van oplossingen en hoge temperaturen)

Dit is een heel intensief proces, en momenteel niet zo efficiënt. Het huidige recycling proces is drie keer duurder dan gewoon lithium te mijnen. Dat betekent natuurlijk niet dat het altijd zo blijft. De vraag naar lithium wordt alleen maar hoger, dus het is een kwestie van tijd voordat iemand een beter proces heeft.

Gesmolten natrium zout accu recycling

Het recyclen van natrium sulfide moleculen van de gesmolten natrium zout accu's zijn met huidige methodes het vaak niet waard. Dit komt omdat het natrium en zwavel heel goedkoop en overvloedig zijn. Het voordeel is dat de materialen van de accu's niet gevaarlijk zijn voor het milieu, en kunnen zelfs met minimale toepassingen bij andere chemische Industries gebruikt worden, dus vaak in plaats van recyclen gebeurt er 'reuse', en dat is een goed alternatief. Als het wel gerecycled wordt, dan wordt de gedemonteerde accu vaak in het staalgieterijproces gegooid om de ijzer en nikkel eruit te halen. De natriumzout blijft dan in de staalslak terecht.

Waterstofcellen

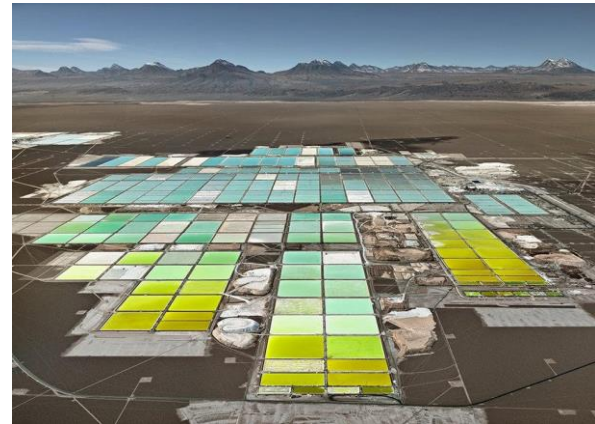
Het mooie hiervan is dat er waterstof wordt gebruikt als het energieopslagsysteem. Daardoor wordt het recycling redelijk makkelijk. Het waterstof verbrand en vormt puur water, dit hoeft niet gerecycled te worden en kan gewoon de grond of rivieren weer in. Waterstofcellen hebben al een redelijk ontwikkeld recyclingsysteem, en de componenten zijn niet te ingewikkeld, dus er bestaan al een aardig hoeveelheid recyclingmethodes.

Les 3: Argumentering en Duurzaamheid

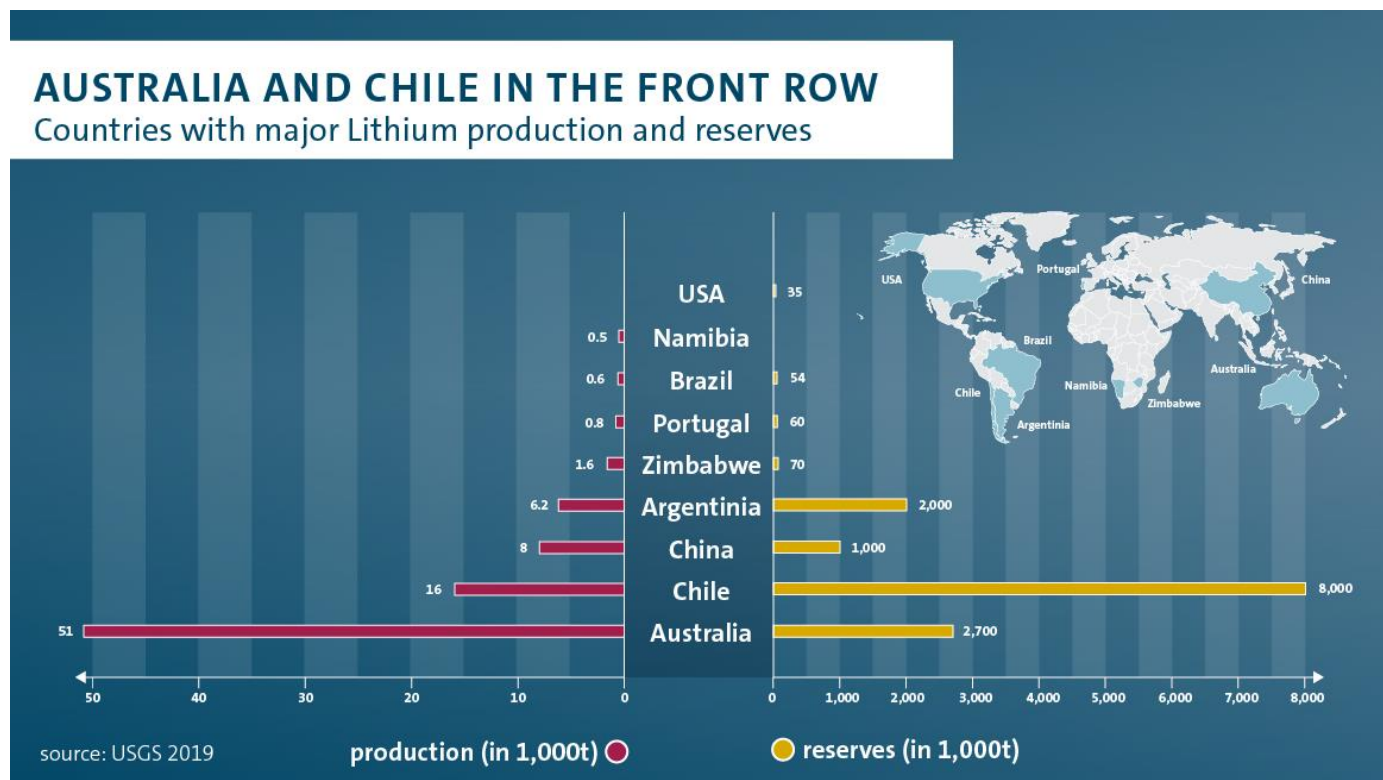
Waar komen de componenten van accu's vandaan?

Lithium:

Lithium is redelijk verspreid in de wereld. In Australië gebruiken ertsers om lithium te winnen, maar landen zoals Chile, China en Argentinië gebruiken een andere techniek: Door lithium laten oplossen in water ondergrond, en dan het naar de oppervlakte pompen om de zon het laten indampen. Daarna wordt het lithium met gebruik van zoutzuur naar een bruikbare vorm omgezet. Met de huidige vraag naar deze metaal, moet er meer en meer worden gemijnd. Het probleem is dat zoutzuur en de bijproducten heel giftig is voor het milieu, en lokale dieren en planten gaan er vaak dood van.



Figuur 8: Lithium mijnbouw in Chile. Bron: Forbes.com



Figuur 9: Waar het meeste lithium vandaan komt (Bron: Volkswagengroep)

Kobalt:

Het heet wel een lithium ion accu, maar er zit veel meer kobalt in een Li-ion accu. Kobalt komt bijna volledig uit één land: de Democratische Republiek van Congo. Deze metaal heeft een historie van onethische mijnbouwpraktijken, prijsfluctuaties, en het is ook giftig. Momenteel is er een race om een lithium accu te maken die geen kobalt gebruikt, maar zo ver hebben de meerderheid van accu's nog steeds grote hoeveelheden kobalt.



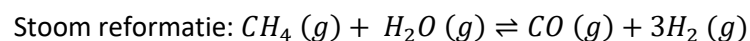
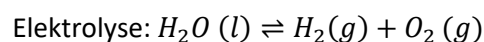
Figuur 10: Een kobalt mijn in de DRC. Bron: [Raconteur.net](https://www.raconteur.net)

Natrium en zwavel:

Natrium is overal, want zout is niet zo moeilijk te vinden. Sinds men het konden, hebben ze zout gewonnen. Zwavel ook, als er een vulkaan in de omgeving is, is er een groot hoeveelheid zwavel.

Waterstof:

Waterstof krijg je door de elektrolyse van water (carbon neutraal, als duurzame energie is gebruikt), het stoom reformatie van methaan (van aardgas niet carbon neutraal, via biomassa kan dat wel carbon neutraal zijn)



Nikkel:

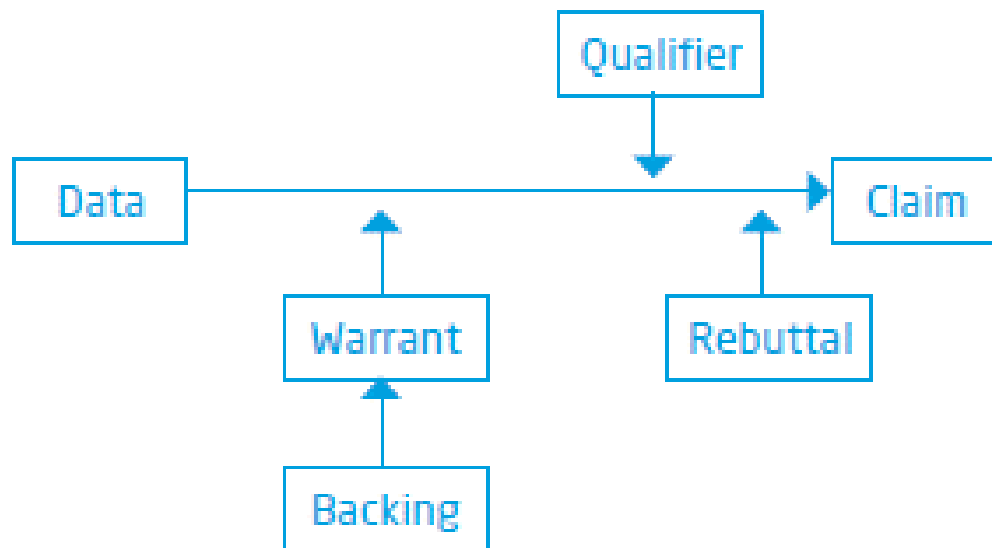
Nikkel is meer verspreid. Het meeste wordt geproduceerd door Indonesië, gevolgd door de Filipijnen, Canada, Australië, en Rusland. Nikkel is ook niet zo schoon. Deze metaal zendt enorme hoeveelheden H_2S en SO_x , in de lucht, plus veel fijnstof dat kanker wekkend kan zijn.

Toulmin's Model voor Argumentatie

Als je gaat bepalen wat voor energieopslagmethode het beste is voor het opslaan van groene energie qua duurzaamheid, moet je ook je positie kunnen verdedigen. Dit wordt gedaan door het gebruik van beknopte en heldere argumenten. Hierdoor gaan we het kort over Toulmin's model voor argumentatie hebben.

Dit model is een manier over hoe je een structureel argument kan opzetten waar wat je zegt wordt gesteund door data en backing.

Er zijn 6 delen van een argument volgens Toulmin. Deze zijn **claim (mening/stelling)**, **grounds (data,**



Figuur 11: Toulmin's argumentatiemodel

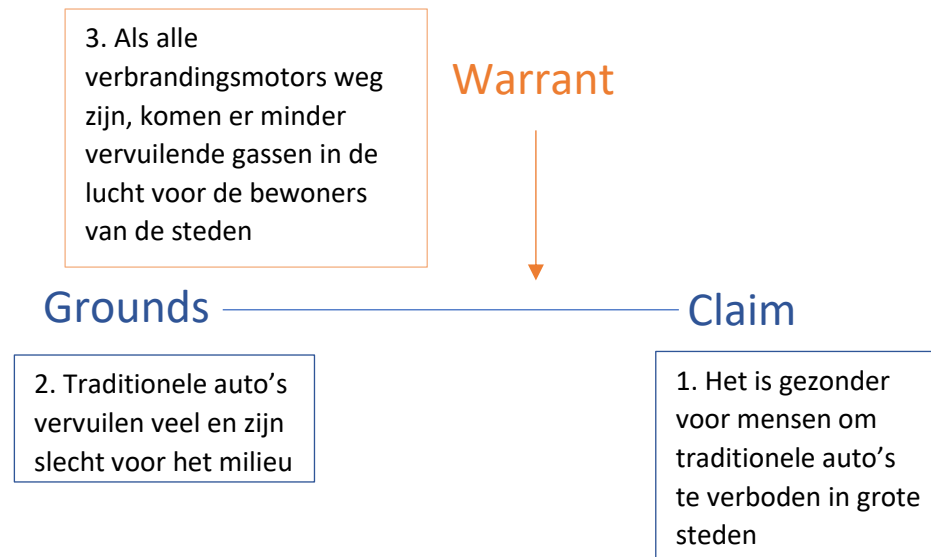
ondersteuning), warrant (rechtvaardiging), qualifier (specificatie) en rebuttal (voorbehoud).

In de kern van een argument zijn de eerste drie stukken: Claim, grounds, en een warrant.

Een **claim** is het standpunt dat je wil nemen, in andere woorden, je hoofdargument.

De **grounds** is het bewijs die je claim ondersteunen – dit is waar je argument op gebaseerd is. Dit heeft vaak de vorm van data, figuren, en feiten.

Een **warrant** kan allebei impliciet of expliciet, en stelt de link tussen de **claim** en **grounds** samen.



Hierboven zie je dus de kern van een argument. Natuurlijk dit argument redelijk kort, en heeft geen concrete data beschikbaar. Gebruik van data zou iets zijn van “een auto vervuilt in x hoeveelheden”, of “NO_x, SO_x, CO_x, en fijnstof zijn kwaadaardig tegen mensen omdat ze veroorzaken x”. Deze grounds wordt dan gelinkt aan de claim door de warrant.

Naast de kern van het argument zijn er verder nog aspecten die er zijn om het argument te versterken: **Backing, qualifier, en rebuttal**

Backing is de extra ondersteuning voor de **warrant**. De backing geeft vaak een sterk voorbeeld of data zodat je je warrant kan rechtvaardigen.

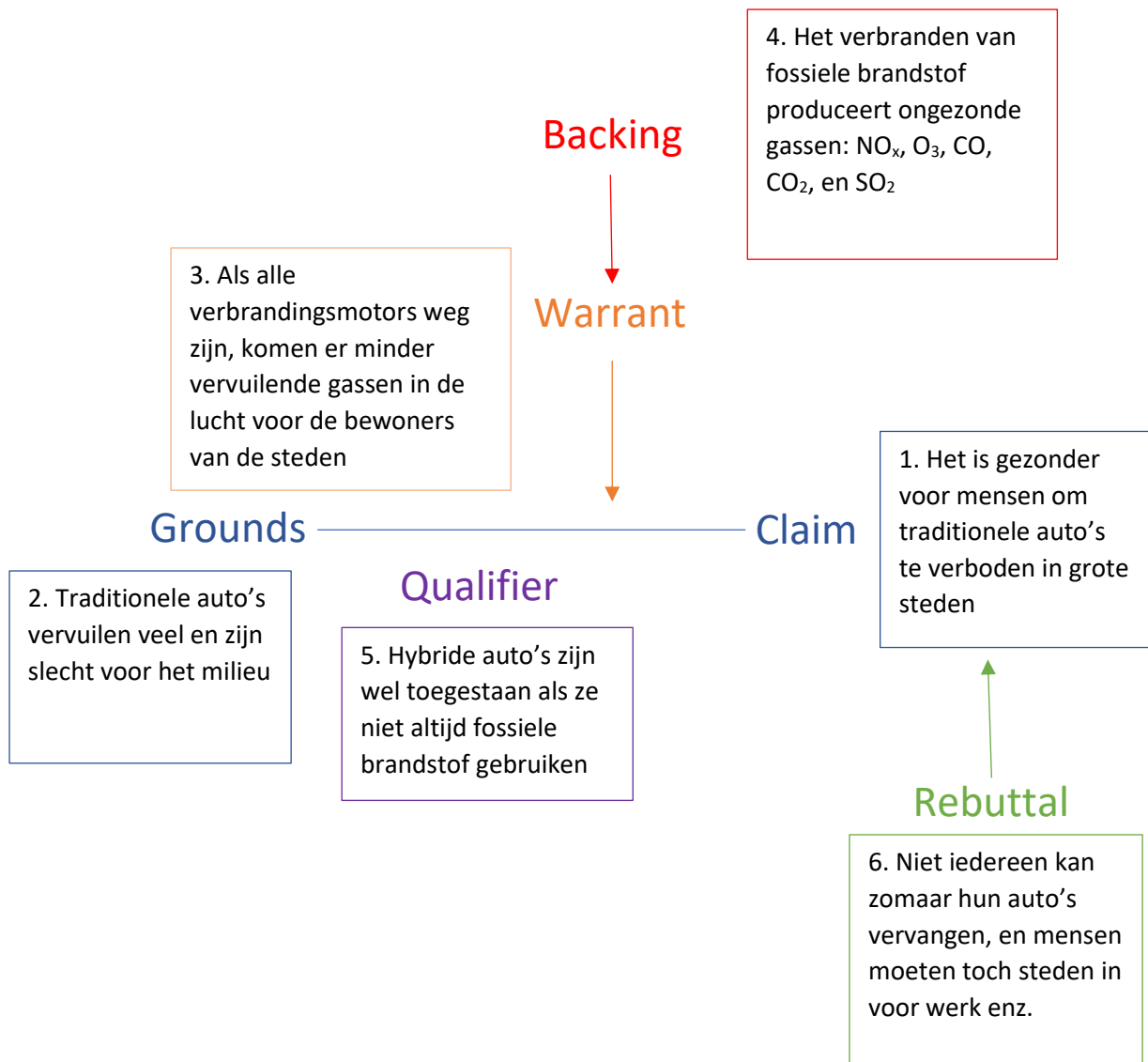
De **Qualifier** laat zien hoe sterk de link is. Dit wordt gedaan met woorden zoals “vaak”, “soms” “altijd” of “af en toe”.

Elk argument heeft meestal wel meerdere tegenargumenten, dus een **rebuttal** wordt gebruikt om te laten zien dat je ook naar de tegenargumenten hebt gekeken. Dit helpt om je publiek te laten zien dat je niet te veel bias hebt. Als je ook een tegenargument hebt, kan je op je eigen tijd laten zien waarom je argument het nog steeds goed behoud.

Opdracht 10:

Op de volgende pagina zie je een volledig argument. Voor je eigen argumentatie ga je niet via een flowchart je argument maken, maar in volledige zinnen.

Gister aan het eind van de les was er gevraagd om te kijken wat het beste energieopslagsysteem is. Denk er nu nog een keertje naar en gebruik de informatie die zover gegeven is om een argument op te stellen. Gebruikt het werkblad hiervoor.



Werkblad: Toulmin's Model van Argumentatie.

Claim: Welk energieopslagsysteem is het beste i.v.m. Duurzaamheid?

Grounds: Wat is je data voor je claim?

Warrant: Waarom helpt je data je claim?

Qualifier: is het opslagsysteem in alle situaties het beste?

Backing: heb je een voorbeeld dat je data versterkt?

Rebuttal: zijn er uitzonderingen, wat zijn de zwaktepunten van dit opslagsysteem

Levenscyclusanalyse (LCA)

Wat is een LCA?

Je hebt vast van klimaat rapporten gehoord en in het nieuws gezien over hoe veel een product CO₂ uitstoot. Bijvoorbeeld in een artikel in de [NOS](#) staat “Een kilo rundvlees eten staat qua broeikasgas-uitstoot gelijk aan 180 kilometer autorijden”. Maar waar krijgen ze dat soort informatie vandaan? Dit wordt gedaan door de analyse van de levenscyclus van een product of proces.

In de volgende paar lessen gaan we doorkijken wat een LCA inhoudt, en dan gaan we die methodes gebruiken om energieopslag methodes te vergelijken qua milieu-impact.

De stappen van een LCA

Een levenscyclusanalyse gebeurt in 4 stappen:

Stap 1 is het definiëren van je “Goal and Scope”. Hierbij bepaal je de inhoud van je onderzoek: Welk product analyseer je? En hoe ver ga je? Tel je alles mee, of kijk je maar naar één levensfase?

Stap 2 is het samenstellen van de “Inventory data”. Hierbij kijk je welke informatie nodig is om bij stap 3 te kunnen uitrekenen wat de milieu-impact is. Dit wil bijvoorbeeld zeggen dat je moet onderzoeken uit welke materialen producten bestaan.

Stap 3 is de “Impact assessment” Hierbij tel je de data gevonden bij stap 2 op, om te kijken wat de impact op het milieu is van het geanalyseerde product.

Stap 4 is de “Interpretation” Hierbij ga je kijken wat jouw data uiteindelijk betekend. Bij een vergelijkend onderzoek kan je hier de uitspraak doen welk product beter is. Daarnaast kan je kijken naar de kwaliteit en zekerheid van je uitspraak.

Stap 1: Goal and Scope

Bij het definiëren van je Goal and Scope, bepaal je het doel en de strekking van het onderzoek. Het doel van het onderzoek wordt vaak voor je bepaald, bijvoorbeeld door het bedrijf dat je inhuurt om de analyse te doen. Je gaat kijken welke methode van energieopslag is het beste voor het milieu.

Vraag 11:

LCAs gaat over milieuvriendelijkheid van producten, kan je bedenken wat voor soort aspecten je naar kan kijken als het over milieuvriendelijkheid gaat? (N.B. het minimaliseren van het broeikaseffect is natuurlijk heel belangrijk, maar is niet het enige wat belangrijk is!)

De “Scope” of *strekking* van je onderzoek, bepaald naar welke delen van de levenscyclus je gaat kijken. Dit maakt nogal uit! De strekking van het onderzoek valt binnen bepaalde grenzen die bepalen waar je naar gaat kijken. Soms is het bijvoorbeeld alleen interessant om naar de productie van een bepaald product te kijken, terwijl een ander bedrijf misschien wil weten hoeveel impact haar product heeft van de ruwe grondstof tot met het uiteindelijke product. Waar je ook naar kan kijken is of je recycling erbij wil houden, of alleen het wegwerpen van het product. Soms kan je zelfs alleen naar het recyclingproces kijken.

Deze stap lijkt niet zo belangrijk, maar het is heel belangrijk omdat je niet te groot project ervan maakt. Als je niet een limit stelt bij bijvoorbeeld de mijnbouw, hoe ver gaat het dan? Moeten we ook kijken naar de impact van de arbeid? Hoe de werkers in de mijnen leven en hoeveel zij uitstoten in hun leven? Het kan zo enorm ver doorgaan, en dan wordt het heel snel te complex om te analyseren.

Er zijn wat standaard 'scopes' die vaker gebruikt worden. Hier zijn verschillende termen voor, deze zijn belangrijk want het geeft informatie wat het LCA-verslag dekt. Drie soorten levenscycli zijn beneden uitgelegd.

Cradle to gate.

De cradle-to-gate analyse analyseert de milieu-impact van het maken van een product. Nadat het product gemaakt is, en desnoods is afgeleverd aan de winkel, houdt het op. Recycling en het gebruiksfase reken je dus niet mee. Het voordeel hiervan is dat de analyse vrij makkelijk te doen is, zeker voor bedrijven die vooral een goed beeld hebben op de productiekosten van een product. Het nadeel is natuurlijk het minder complete beeld dat het kan geven. Als je bijvoorbeeld twee producten vergelijkt, waarbij één van de twee veel minder energiezuinig is als de andere, komt dit niet naar voren bij een cradle to gate analyse.



Figuur 12: een levenscyclus

Cradle to grave.

De meest uitgebreide levenscyclus is de "cradle to grave" lifecycle. Hierbij kijk je echt naar alles wat er nodig is om een product tot stand te brengen. Je begint bij de ruwe grondstoffen, en eindigt pas als het product gerecycled is, of beland is op de vuilstort. Je kijkt ook naar de uitstoot die het product gedurende zijn leven creëert. Als je een auto analyseert, kijk je bijvoorbeeld ook naar de benzine die deze gebruikt gedurende zijn levenscyclus. Het voordeel hiervan is dat het een erg compleet beeld geeft. Het nadeel is dat de analyse zelf vaak uitgebreider, en daardoor ook lastiger is dan andere oplossingen.

Cradle to cradle

Een variatie van de "cradle-to-grave" levenscyclus, deze wordt ook soms "closed-loop life cycle" genoemd. Net als de cradle-to-grave, je begint bij de ruwe grondstoffen, maar deze keer eindig je pas na het recyclingproces, in plaats van ervoor. Dit gaat ook vaak over de optimale levenscyclus, want als alles gerecycled wordt, dan komt het in een soort circulaire economie.

Vraag 12:

De EU overweegt het invoeren van een "Carbon Tax": een belasting op CO₂ uitstoot. Hiervoor zou het grote bedrijven verplicht worden de CO₂ uitstoot van de gemaakte producten uit te rekenen. Welk van de twee levenscycli denk je dat het meest geschikt is hiervoor?

Impact categorieën

Eerder werd er gevraagd wat voor andere aspecten er zijn over milieuvriendelijkheid, dit heeft officiële categorieën, en heten "impact categories". Deze designaties waren gemaakt door allerlei organisaties om het te standaardiseren. Wij gaan voor deze les niet alleen over de meest bekende categorie: "global warming potential". Dit is omdat er meer dan een manier is om te vervuilen. De belangrijkste impact categorieën worden soms uitgekozen door de opdrachtgever, of bepaald door de onderzoeker zelf. Soms is het ook beperkt door de data die beschikbaar is.

Global Warming Potential (GWP)

Tegenwoordig het meest besproken en belangrijke categorie. Dit gaat om CO₂ uitstotingen. Maar het broeikas effect komt niet alleen door CO₂, gasen zoals methaan en distikstofmono-oxide hebben

ook een heel groot effect op het broeikas effect. Kijk maar in de tabel hieronder, die weergeeft hoe sterk het broeikas effect van verschillende gassen zijn.

Stof per kg.	Relatief global Warming Potential na 100 jaar (GWP-100)
Koolstofdioxide	1
Methaan	28
Distikstofmono-oxide (lachgas)	265

Vraag 13:

Hoeveel kg CO₂ uitstoot heeft na 100 jaar hetzelfde effect als 1 kg lachgas?

Kg-equivalenten

Om ervoor te zorgen dat de verschillende soorten impact met elkaar vergeleken kunnen worden, worden ze omgerekend naar een standaard eenheid. Voor de GWP, is dat CO₂ equivalenten gebruikt, en wordt aangegeven als CO₂-eq of CO₂-equivalent.

Vraag 14:

Stel, een koe stoot 10 kg methaan uit om 1000 liter melk te maken. Om de melk vervolgens te koelen en naar de supermarkt te rijden, wordt ook 10kg CO₂ en 1 kg N₂O uitgestoten. Hoeveel kg CO₂-equivalenten worden er uitgestoten voor de productie van 1 liter melk?

Ozone Depletion Potential (ODP)

Deze impact categorie was tijdens de "Montreal Protocol" opgezet. De ozone depletion potential gaat over hoe veel een kg van een molecuul de ozon laag kan vernietigen. Tijdens de jaren 80 was Montreal protocol opgezet en was een groot succes in internationale politiek en samenwerken. Een groot deel van de Protocol was om een type molecuul verboden te maken in de hele wereld. Deze type heten chloorfluorkoolstoffen (CFK, of CFC in het engels), zoals freon. Deze cfk's waren vaak gebruikt als koelmiddelen. Cfk's zijn tegenwoordig verboden, maar er zijn ook andere moleculen die de ozon laag kunnen vernietigen. Om een standaard eenheid ervan te maken, gebruiken ze CFC-11-eq. (N.B., CFC-11 is trichloorfulormethaan). Tegenwoordig zijn bijna alle producten die een CFC-11-eq van boven nul is verboden, maar toch kan een bijproduct van een proces wel een CFC-11-eq boven nul hebben. Daarom wordt dit nog steeds gebruikt tijdens levenscyclusanalyses.

Human Toxicity Potential

Heel veel chemische stoffen zijn giftig voor mensen. Veel processen maken allerlei bijproducten die potentieel heel gevaarlijk kunnen zijn. Het is natuurlijk moeilijk om te weten hoe giftig een molecuul is tenzij het intiem is bestudeerd. De Human Toxicity Potential wordt gedefinieerd als: het potentiële gevaar dat een hoeveelheid van een stof dat in het milieu terecht komt, en de relatieve giftigheid van de voorgenoemde stof.

Zo zijn er een stuk meer impact categorieën, en vaak wordt een LCA gedaan met een belangstelling naar de meest belangrijke categorieën voor de processen en materiaal die gebruikt worden. Op de volgende pagina zie je een lijst van wat verschillende impact categorieën

Impact category / Indicator	Unit	Description
Climate change – total, fossil, biogenic and land use	kg CO ₂ -eq	Indicator van de mogelijke verwarming van de aarde door de uitstoot van broeikasgassen die in de lucht terecht komen. Dit is verdeeld in 3 subcategorieën, fossiele bronnen, bio gebaseerde bronnen, en landverbruik veranderingen
Ozone depletion	kg CFC-11-eq	Uitstoting naar de lucht die de vernietiging van de stratosferische ozon laag veroorzaken.
Acidification	kg mol H ⁺	Indicator van de mogelijke verzuring van de grond en water door het vrijkomen van gasen zoals SO _x en NO _x
Eutrophication – freshwater	kg PO ₄ -eq	De verrijking van het zoetwaterecosysteem door voedingselementen door de uitstoting van stikstof- en fosforhoudende stof
Eutrophication – marine	Kg N-eq	De verrijking van zoutwaterecosysteem door voedingselementen door de uitstoting van stikstofhoudende stoffen
Eutrophication – terrestrial	mol N-eq	De verrijking van aards ecosysteem door voedingselementen door de uitstoting van stikstofhoudende stoffen
Photochemical ozone formation	kg NMVOC-eq	Indicator van uitstotingen van gasen die invloed hebben op het maken van fotochemisch ozon in de lagere atmosfeer (smog)
Depletion of abiotic resources – minerals and metals	kg Sb-eq	De uitputting van natuurlijke niet-fossiele bronnen
Depletion of abiotic resources – fossil fuels	MJ, net calorific value	De uitputting van natuurlijke fossiele bronnen
Human toxicity – cancer, non-cancer	CTUh	De impact van mens van giftige stoffen die in het milieu worden uitgestoten. Deze indicator is verdeeld in niet-kanker, en kanker gerelateerde giftige stoffen
Eco-toxicity (freshwater)	CTUe	Indicator over het effect op zoetwaterorganismen van giftige stoffen die uitgestoten zijn in het milieu
Water use	m ³ world eq. deprived	Het relatieve watergebruik, gebaseerd op de regionale water schaarsheid factoren
Land use	Dimensionless	Maat voor de verandering in aarde kwaliteit.
Ionising radiation, human health	kBq U-235	Schade aan menselijk gezondheid en ecosystemen als gevolg van de uitstoot van radioactief materiaal.
Particulate matter emissions	Disease incidence	Indicator voor de potentiële gebeurtenis van ziekte door de uitstoot van fijnstof.

Tabel 1: verschillende impact categorieën en hun equivalenten.

Opdracht 15:

Een energiebedrijf vraagt je om een LCA voor ze te doen, dit bedrijf wil de levenscyclus van kool die ze gebruiken hebben. Het bedrijf zegt dat ze een analyse wil hebben van het mijnen, transport, en het gebruik in de energiecentrale. Ze weten niks van duurzaamheid, dus ze vragen jou om te bepalen welke impact categorieën het belangrijkste zijn.

Kijk naar Tabel 1, en kies de 3 die je het meest belangrijk vindt als categorieën.

Bonus: wat voor soort LCA is het? (Cradle-to-grave, cradle-to-cradle, etc.)

Functional Unit

Opdracht 16:

Als je twee dingen vergelijkt, moet je dat natuurlijk wel eerlijk doen. Welke variabele moeten voor het vergelijken van de milieu-impact voor beide accu's gelijk zijn? Kies uit de variabele in de lijst hieronder.

Hoeveelheid opgeslagen energie	Aantal cycli (Hoe vaak de accu opgeladen en ontladen kan worden)
Grote van individuele accu's	Voltage van de stroom
Meetmethode van milieu-impact	Gewicht
De veiligheidseisen	Kosten van de accu

De functional unit bepaald grotendeels wat je gaat onderzoeken. In de functional unit staat de "functie" die voldaan moet worden door de "eenheid" die je onderzoekt.

Als we meerdere energieopslag methodes vergelijken voor het milieu impact die ze beïnvloeden, moeten we een eenheid maken waar we dezelfde functies vergelijken. Hoe doen we dit?

Stel je doet onderzoek naar de duurzaamheid van twee verschillende vaatwasmachines, dan kan je de functional unit al volgt nemen:

"Een vaatwasser die 20 sets bestek per dag afwast gedurende 10 jaar"

In deze functional unit staan een paar belangrijke dingen. Natuurlijk benoem je wat je onderzoekt, hier dus "Een vaatwasser". Maar je kijkt ook naar de hoeveelheid product die nodig is: "die 20 sets bestek per dag afwast" omschrijft de hoeveelheid die gebruikt wordt.

Als je dan een grotere vaatwasser analyseert, bijvoorbeeld een die 40 stuks bestek kan afwassen in een keer, hoeft deze maar 1 keer in de 2 dagen te draaien. Dit heeft natuurlijk ook invloed op de hoeveelheid energie die de vaatwasser gebruikt.

Daarnaast kijk je nog naar de levensduur. "Gedurende 10 jaar" bepaald hoe lang de vaatwasser mee moet gaan. Stel een bepaald merk gaat maar 5 jaar mee, dan heb je er dus twee nodig om aan de functionele unit te voldoen. Dit wil zeggen dat je alle uitstoot die hoort bij de productie van de vaatwasser moet verdubbelen.



Functional Unit van een accu

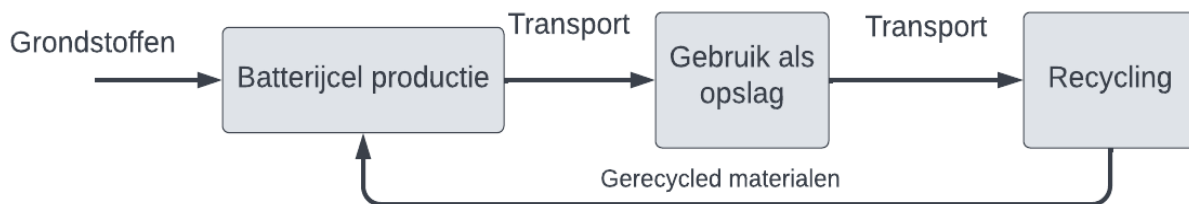
Vaak is het bepalen van een functional unit redelijk eenvoudig. Voor een biefstuk bijvoorbeeld is de functional unit gewoon "1kg rundvlees". Deze functional unit is makkelijk omdat het over een hoeveelheid gaat die meteen gebruikt wordt, en heeft maar een functie: om op te eten.

Als we het over een accu hebben, dan is het verhaal anders. Accu's hebben een andere functional unit als ze in een auto zitten dan als grootschalig energieopslag. De levensduur is ook een essentieel aspect van een accu voor energieopslag, maar massa niet (want het beweegt niet, dit zou wel belangrijk zijn in een elektrische auto).

Voordat we de functional unit volledig gaan definiëren, gaan we eerst nog verder vooruit kijken.

Inventory analysis

Nu dat bekend is wat je gaat onderzoeken, is het tijd om te kijken welke data nodig is om je onderzoek te doen. Dit is de zogenaamde “Inventory analyse”. Stap 1 is bepalen hoe de producten gemaakt worden. Hierom hebben we ook een practicum gedaan, zodat je een beeld hebt bij wat er moet gebeuren om een accu te maken. Vaak wordt het productieproces opgedeeld in een flowchart of blokschema, zodat het overzichtelijk is wat er gebeurt. Een erg versimpelde flowchart voor accuproductie staat hier onder:



Natuurlijk is dit blokschema niet compleet. Welke grondstoffen er gebruikt worden, en hoeveel moeten we er nog in zetten. Wat wel te zien is zijn de drie “Fases” van het leven van een accu: De productie, het gebruik als opslag en de recycling. Deze drie fases kunnen we apart analyseren.

Om te meten wat de uitstoot is bij een productieproces, moet je eigenlijk langs bij de fabrieken, en nameten hoeveel er uitgestoten wordt bij elke stap in het maken van bijvoorbeeld een accu. Dit kost natuurlijk veel tijd en geld. Stel je voor dat dit voor elk product gedaan moet worden! Om dit probleem op te lossen bestaan er grote databases zoals Ecoinvent, waarbij verschillende processen of grondstoffen en hun uitstoot gegeven staan. Door te kijken welke processen en grondstoffen er gebruikt worden, deze op te zoeken in de database, en vervolgens de genoteerde uitstoot bij elkaar op te tellen, kan je ook de totale uitstoot berekenen, zonder dat je voor elk nieuw product een heel onderzoek moet doen. Daarnaast kan je de uitstoot van nieuwe producten hiermee ook al in de conceptfase inschatten, dus nog voor dat het product überhaupt gemaakt wordt.

Om te bepalen welke accu beter is, kijken we natuurlijk naar de milieuimpact. Deze is dus op veel verschillende manieren te meten, en hoe meer informatie je hebt, hoe meer compleet je het eindresultaat kan maken!

Opdracht 17:

We nemen even een pauze van accu's, en gaan naar bakstenen kijken. Hieronder is een voorbeeld LCA over bakstenen. Om de milieu impact van het transport uit te rekenen gebruiken we “per 1000 kg per km” om te laten zien hoeveel materiaal er getransporteerd moet worden. Dit wil zeggen dat je moet uitrekenen hoe vaak 1000kg aan accu, 1 km aflegt. Als je bijvoorbeeld 50 kg aan accu, 1000 km laat rijden, is dit hetzelfde als 1000 kg, die 50 km aflegt. Samen met een klasgenoot, bereken aan de hand van de volgende gegevens het GWP (in Kg CO2 e.q.) per functional unit.

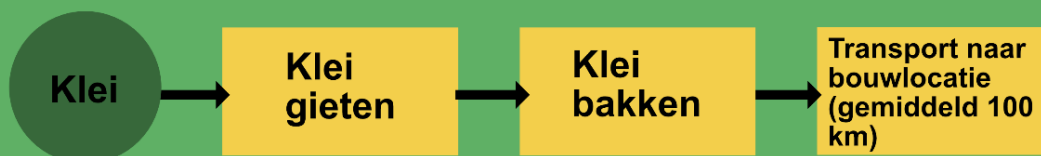
Functional Unit: 100 stenen die gedurende 30 jaar in een enkelsteens muur 1400kg dragend vermogen behouden.

Scope: Cradle to grave analyse

Alleen de CO2 impact wordt meegenomen.



Productiediagram van een baksteen (800g)



Recycling van schoon bouwpuin (1000 kg)



Database gegevens

	Kg CO ₂ e.q.
Clay mining per tonne	8.8
Industrial clay molding and firing per tonne.	825
Transport (Road, Diesel Truck) per tonne per km	4.8
Industrial stonebreaking per 1000 kg	0.32
Picking and cleaning stone debris per tonne	0.16

Terug naar functional units

Uiteindelijk willen we allemaal hetzelfde functional unit om verschillende systemen met dezelfde functie te vergelijken. Voor ons is dat de volgende energieopslagmethodes: Li-ion accu's, molten sodium salt accu's, en waterstofbrandcellen.

Opdracht 18:

Bedenk een functional unit voor je eigen onderzoek naar energieopslagmethodes. Hint: de gemiddelde levensduur van deze methodes is ongeveer 10 jaar. Na dat je eentje hebt gekozen, gaan we het met de klas samen overleggen

Nu dat je een functional unit hebt bepaald, en weet welke levenscyclus je gaat bekijken, kan je je LCA gaan doen. Nu gaan we door met onze LCA om te bepalen welk energieopslagmethode is het meest duurzaam.

Opdracht 19:

Nu dat je weet wat je functional unit hoort te zijn, moeten we kijken hoeveel kilo het 1MWh energieopslagsysteem weegt. Gebruik de volgende tabel om de Lithium en Natrium accu's functional unit te berekenen.

Opslagstelsel	Energiedichtheid Wh/kg	Aantal kilos / Wh	Aantal kilos / MWh
Lithium-ion accu	220		
NaCl accu	120		

Opdracht 20:

Nu gaan we de productie inventory analyse eerst doen. Gebruik het Excel-document. Ga naar de eerste sheet. Hier zie je de Life cycle inventory, of LCI van deze accu's. Gebruik je antwoord van taak 9 en vul deze sheet in om de hoeveelheid (in massa) van elk component per functional unit te vinden (let op, vul de juiste cel in en dan doet de Excel sheet het zelf).

Opdracht 21:

Transport is ook een belangrijk aspect van de levenscyclus. Vaak is het zelfs een groot deel van de totale hoeveelheid van de impact categorie. Voor accu's, de meeste komen van Japan, China, en de VS. In onze LCA gaan we er van uit dat al onze accu's van Japan naar Nederland worden gebracht.

*Om transport te berekenen, kijken we naar de afstand van transport en het gewicht van de lading, en ze gebruiken de unit tonne*km. Om een vrachtschip naar Nederland te brengen, is het ongeveer 20.500 km varen. Hierboven moeten vrachtwagen gemiddeld 50 km rijden.*

Reken voor jou functionele unit de juiste waardes uit bij alle transportstappen., en vul deze in het Excel document op de "Inventory analysis" pagina.

Het Rekenmodel

We gaan nu even het rekenmodel bekijken. Op deze pagina worden de resultaten berekend. Hierbij staat al een GWP mini database voor de relevante materialen en processen van het maken en gebruik van een lithium ion accu. Samen met de database en wat je hebt ingevuld worden de GWP berekend voor onze lithium-ion accu.

Opdracht 22:

Nu moet de gebruiksfase ingevuld worden. Dit zijn de uitstotingen van de accu terwijl hij gebruikt is. Dit is dus de uitstotingen van de elektriciteit die gebruikt wordt om de accu op te laden, plus het

gebruik verlies. Als je naar het rekenmodel kijkt, kan je het gemiddelde uitstoting zien van het Nederlands energienet, ongeveer 0.51 kg CO₂-eq per kWh. Dus tijdens het laden van een accu met een capaciteit van 1MWh, kost het 500 kg CO₂. Per leeftijd van een Li-ion accu, zijn tussen de 3000-4000 cycli, dus gedurende de leeftijd van een accu, is deze 500 kg een extra 3000 keer opgeteld.

Vul de efficiëntie van de Li-ion accu in op de 'inventory analysis' pagina op Excel. Met de efficiëntie kunnen we het energieverlies berekenen tijdens elk laad/ontlaadt cyclus. (Hou de capaciteit nog even leeg)

Opdracht 23:

Kijk naar het derde tabblad van het Excel file. Hierin zie je een breakdown van de vier verschillende aspecten van de LCA: materialen, stroomverbruik, transport, en assemblage. Deze pagina heeft twee grafieken, eentje met het gebruik van het gemiddeld energienet van Nederland, en het ander als al de energie alleen van een zonnepaneel komt.

Hier zie je al een groot verschil tussen de twee grafieken, en het komt helemaal uit de gebruiksfase, of stroomgebruik. Maar op het moment wordt alleen maar het stroomverlies meegeteld.

Ga terug naar de 'inventory analysis' en vul nu de capaciteit van de accu in en kijk weer naar de grafiek. Nu heb je de volledige gebruiksfase erin zitten.

Zo kun je zien dat het gebruik het grootste onderdeel is van de CO₂-eq uitstotingen zijn, en je ziet ook hoe veel het verminderd is als je zon energie gebruikt!

Omdat de uitstotingen door het gebruik van de accu helemaal van elektriciteitsopwekking komt, blijft dat het zelfde voor elk energieopslagsysteem die we gaan bekijken, Dus dat kunnen we nu uitzetten en hoeven we er niet meer over te denken

Wis het capaciteit cel in de 'inventory analysis' weer uit.

Het volledige LCA

We hebben nu de GWP van een van onze accu's berekend, dus om tijd te besparen zijn de overige impact categorieën en energieopslagsystemen voor je gedaan.

Kijk nu naar de laatste tabblad 'Grafieken met recylen'. Hier zie je meerdere grafieken die voor verschillende impact categorieën een vergelijking maakt tussen Li-ion accu's, molten salt accu's, en waterstofcel.

Dit is heel veel data, dus maak niet te veel zorgen, alles wat je momenteel hoeft te doen is bekijken welk opslagsysteem het laagste voetafdruk heeft, en welk het hoogste (en of ze veel hoger/lager zijn).

De volgende klas gaan jullie allemaal een argument stellen over welk opslagsysteem je het beste voelt, dus voor huiswerk denk er wat over na!

Les 6:

Data-analyse

Nu dat je een grote hap data hebt gezien, komt nu het belangrijkste stap: de interpretatie. Het makkelijkste wat je kan doen met de data die je krijgt is kijken naar het laagste nummer bij elk impact categorie, maar zo simpel is het niet. Elk impact categorie heeft een belang, en iedereen denkt er anders over. Een zeebioloog stelt meer belang naar 'marine eutrophication' en 'acidification potentials', want die willen zeker maken dat de vissen en koraal niet doodgaan. Voor hetzelfde geld, wil het ministerie van Volksgezondheid meer vermindering in 'human toxicity potential' en 'photochemical ozone creation potential'. Zo moeten jullie hier ook over nadenken en je argument eraan toepassen.

Dus nu is de grote vraag van onze LCA: **Welk energieopslag methode is het meest duurzaam?** Het was gevraagd dat je thuis had nagedacht over welk energieopslagsysteem het meest duurzaam is. Jullie krijgen nu tijdens de les tijd om je gedachten hierover op te schrijven.

Opgdracht 24:

Ga in je eentje een argument opschrijven over wat jij denkt welk energieopslagsysteem het meest duurzaam is. Gebruik hiervoor **Toulmin's argumentatiemodel** voor deze taak, dus gebruik een **claim, grounds, warrant, qualifier, en rebuttal** voor je argument. Deze keer gebruik volle zinnen en creëer een ongebroken argument.

Bewaar een kopie van dit argument en lever het in bij je docent.

Opgdracht 25:

Nu ga je in kleine groepjes bedenken hoe andere groepen en belanghebbende organisaties hier over denken. Je docent geeft je een organisatie, net zoals de tweede kamer, de RIVM, een energiebedrijf, de vissers vakbond. Denk hier goed bij na:

- Veranderd je argumentatie nu? Zijn er belangstellingen die je nieuwe gezichtspunt anders heeft dan van jezelf?
- Welke impact categorieën zijn nu meer belangrijk?
- Kan je hiervan zien waarom soms de prioriteiten van verschillende groepen conflict kunnen opwekken?

Nu gaan we samen als deze organisatie met de hele klas en de docent het overleggen. Luister naar je argumenten van je klasgenoten, zijn er verschillende antwoorden en redeneringen? Zijn er sterke argumenten? Zijn de antwoorden verschillend? Hoe komt dat?

Na de les geef je definitieve argumenten aan je docent (je eigen en de groepsversie).

Appendix B:

Learning goals

Lesson series:

- Students are able to use clear argumentation on which energy storage system is the most sustainable
- Students understand and can use life cycle analysis data to back up their argumentation
- Students understand the difference between various energy storage systems including lithium-ion batteries, molten salt batteries, and hydrogen fuel cells.
- Students show basic understanding of the steps involved in creating a life cycle analysis of a product

Lesson 1:

- Students can create a simple iron nickel battery in a petri dish
- Students understand the chemistry of recharging a battery, and use this to recharge the iron nickel battery
- Students can explain key concepts such as: a cell, half-cell, battery components, and green energy.

Lesson 2:

- Students understand how to calculate energy density from battery specifications.
- Students can explain the difference between a lithium-ion battery, a molten salt battery, and hydrogen fuel cells
- Students have a basic understanding of the difficulties involving recycling batteries, particularly for lithium-ion batteries

Lesson 3:

- Students understand that sourcing materials to make batteries can take a toll on the local environments and can name some of the difficulties involved in mining these materials.
- Students are able to use Toulmin's argumentation model in order to convey their conceptions on which energy storage system is the most sustainable with the information given to them so far.

Lesson 4:

- Students can break down the steps required to make an LCA
- Students can explain the differences between cradle to grave, cradle to gate, and cradle to cradle.
- Students understand the impact categories involved in creating an LCA, and can point out the differences between some of them.

Lesson 5:

- Students can create a functional unit for batteries
- Students can apply their knowledge on life cycle analysis to solve a simple LCA calculation on bricks
- Students are able to use the data on the provided Excel sheet, and calculate the required data to process the Excel document further
- Students understand how the life cycle theory can be used to analyze real world life cycle inventory data.

Lesson 6:

- Students can explain how the data they are using relates back to the LCA calculation process
- Students can use the graphs provided to create an argument for which energy storage system is most sustainable

- Students are able to analyze the data from the life cycle analysis from both their own viewpoint, and the viewpoint from a different perspective, and show the difference of reasoning for viewpoints.

Appendix C:

Interview protocols (Dutch)

Interview protocol teachers:

With the walkthrough with the educators, the focus is on relevancy, consistency, major issues/errors, the expected practicality and expected effectiveness.

Begin:

Hallo, ik ben Michiel. We zijn hier om samen door de lesbrief te bladeren om feedback te krijgen over de inhoud en structuur van de lesbrief. Er zijn 5 verschillende karakteristieken die specifiek naar gekeken worden: **relevantie, consistentie, verwachte uitvoerbaarheid, verwachte effectiviteit, en fouten en/of problemen.**

Na deze feedback, samen met feedback van een micro-evaluatie, en een gesprek met een expert, wordt dit lesbrief verbeterd. Als u wilt, kan ik een kopie geven aan u als hij gewijzigd is.

Deze interview hoort ongeveer 1 uur te duren, en wordt opgenomen.

Startende vragen:

1. Heeft u een kans gehad om door de lesbrief te bladeren?
2. Wat is uw eerste indruk van deze lessenserie?

Als ze nog niet de lesbrief hebben gelezen van tevoren

Geef de geïnterviewde 5-10 minuten om de inhoud zelf te controleren. Misschien de kamer verlaten voor die tijd.

Vragen over de hele lesbrief

1. Wat vind u van de volledige lessenserie? is het coherent? - zit er een goede doorgaande lijn in?
 1. Als nee, waar zitten de problemen?
2. Volgen de individuele lessen en hun inhoud elkaar duidelijk?
3. Schat u in leerlingen 5 vwo die elektrochemie al hebben genoten, voldoende kennis hebben om hieraan mee te doen?
4. Zou deze lessenserie in het Nederlands onderwijs curriculum passen?
 1. Als dit een ander deel van scheikunde onderwijs moet vervangen, wat zou er uit moeten?
 2. Ziet u dit als een uitbreiding van een van de voorstaande vakken in scheikunde?
5. Is het inhoud op een voldoende niveau voor vwo 5 leerlingen?
6. Zijn er aanpassingen die je in de inhoud zou maken?
 1. Zou jij andere energieopslag systemen gebruiken als voorbeelden?
 2. Is de hoeveelheid van de lessen te lang/te kort om het lesmateriaal te begrijpen?
7. Hoe effectief is deze lessenserie om leerlingen duurzaamheid aan te leren in een echte wereld?
8. Leren leerlingen hier over hoe handig levenscycli en het analyseren ervan om naar processen en producten te kijken i.v.m. duurzaamheid/ het milieu

Vragen over de individuele lessen:

1. Past deze les bij de volledige lesbrief?
 1. Zit er een goede doorgaande lijn in?
2. Zijn er inhoudelijke toepassingen die je hier ergens in deze les wil maken?
3. Heb je nog overige feedback of commentaar over deze les?

Protocol leerlingen

Interview sectie van de leerlingen is anders dan de docenten: de leerlingen gaat het meer over de ervaring. Vergelijk met de oorspronkelijke lesbrief.

LCA en chemie inhoud aankoppelen met de discussiëren. Hoe het niet straight forward is, en de uitdagingen ervan

1. Wat vond je van deze activiteit
2. Wat vond je er opvallend aan
3. Heb je ideeën om het te verbeteren?
4. Kun je duiden wat je daarvan vindt in termen van interessante en qua chemie inhoud.
5. Als je het legt naast andere scheikunde inhoud wat is dan je mening.
6. Als je dit onderwerp vergelijkt aan organische of biochemie, kun je iets zeggen over de relevantie of praktische vermogen.

Activiteit: eerst individueel (10-15 minuten), daarna in groep. (10-15 minuten).

Moeten kiezen welk stakeholder groep ze het perspectief ze het uitnemen: de overheid.

“Groene agenda” dingen moeten vergroend worden. Wind en zon energie moet uitgebreid worden. Dus opslag is cruciaal. Ten alle tijde energie te leveren aan de bevolking. Rekening houden met andere milieu uitdagingen. Kies impact categorieën die studenten direct een link kan aanbouwen.

Kies het meest duurzame opslagsysteem i.v.m. het perspectief van de overheid.