



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Bachelor-Arbeit (Naturwissenschaften und Technik)

Bachelor-Studiengang in Umweltnaturwissenschaften

Welches Potenzial hat das Schienennetz für Photovoltaikanlagen?

Referent: Prof. Dr. Felix Kienast
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
WSL, Birmensdorf

Johannes Alt
17-931-239

13. August 2020

Zusammenfassung

Mit der Energiestrategie 2050 soll der Energieverbrauch gesenkt, die Energieeffizienz erhöht und die erneuerbaren Energien gefördert werden. Mit ihr verbunden ist auch der sukzessive Ausstieg aus der Kernenergie, was zu einer Stromlücke von 24.5 TWh bis 2050 führt. Diese Stromlücke soll möglichst durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden. Da die Schweiz sehr dicht besiedelt ist, bietet es sich an, bereits bestehende Infrastruktur mit erneuerbaren Energien auszustatten, um das Landschaftsbild zu schonen. Eine bisher weitestgehend unerforschte Möglichkeit hierfür stellt das Schienennetz dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine erste Schätzung für die Grössenordnung der Energie, welche aus dem Schienennetz gewonnen werden kann, abzugeben. Genauer wurde in dieser Arbeit untersucht, wie gross das Potenzial für Photovoltaik-Module (PV-Module) auf den Gleisanlagen der Schweiz und von Europa ist. Dabei wurde zwischen PV-Modulen auf den Schwellen und PV-Modulen auf dem Oberbau und den Banketten unterschieden. Für die Strecken Zürich – Luzern, Luzern – Schüpfheim – Bern und Davos Dorf – Le Prese wurde das Potenzial anhand einer Luftbildanalyse berechnet. Diese Ergebnisse wurden anschliessend mit einer GIS-Modellierung verglichen. Auf der Basis dieses Vergleichs konnte die Fläche und Energiemenge des Schienennetzes der Schweiz berechnet werden und eine Extrapolation auf das europäische Schienennetz durchgeführt werden.

Für das Schienennetz der Schweiz ergab sich für PV-Module auf den Schwellen eine mögliche Energieproduktion von 475 GWh/a auf einer Fläche von 7'502'713 m². Berücksichtigt man den Oberbau und die Bankette, so ist eine Energieproduktion von 5'159 GWh/a auf einer Fläche von 40'729'647 m², was einem Tausendstel der Schweizer Landesfläche entspricht, möglich. Für PV-Module auf den Schwellen des europäischen Schienennetzes liegt die potenzielle Energieproduktion im Bereich von 9.5 – 23.8 TWh/a auf einer Fläche von 150 – 375 km². Wird zusätzlich noch das Schotterbett und die Bankette berücksichtigt, so ergibt sich eine potenzielle Fläche von 816 – 2'040 km², auf der eine Energieproduktion von 103.4 – 258.4 TWh/a möglich ist.

Diese Berechnungen zeigen, dass andere erneuerbare Energien der Photovoltaik bezüglich der produzierten Energiemenge pro Fläche zwar überlegen sind, die Photovoltaik jedoch im Stande ist, aus bereits stark genutzten Flächen signifikante Mengen an Energie zu gewinnen. Bei einer Bestückung des Oberbaus und der Bankette mit PV-Modulen könnte der Energiebedarf des Schweizer Bahnbetriebs von 2'323 GWh aus dem Jahr 2018 gedeckt werden. Bei einer Installation von PV-Modulen auf den Schwellen des Schweizer Schienennetz könnten 20 % dieses Energieverbrauchs gedeckt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, von denen ich bei dieser Arbeit unterstützt wurde. Besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Felix Kienast, der mir als Betreuer zur Seite stand. Mit ihm zusammen konnte ich das Thema und die genaue Fragestellung dieser Bachelorarbeit abstecken. Ausserdem stand er mir trotz dieser speziellen Zeit jederzeit zur Verfügung und half mir stets, wenn die Arbeit ins Stocken geriet. Weiter möchte ich ihm für das Zusammenstellen des verwendeten Datensatzes danken. Abschliessend möchte ich Matteo Riva für das Bereitstellen der benötigten Luftbilder und seine Nachsicht für anfängliche Schwierigkeiten hierbei bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Danksagung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Glossar	VII
1. Einleitung.....	1
2. Fragestellung und Zielsetzung.....	4
3. Stand der Technik.....	5
3.1 Klassifikation der Photovoltaikzellen.....	5
3.2 Effizienz von Photovoltaikmodulen	6
3.2.1 Effizienz von Photovoltaikmodulen aus der Literatur	6
3.2.2 Effizienz von Photovoltaikmodulen auf dem Markt.....	7
3.3 Einfluss der Witterung auf die Effizienz von Modulen	7
3.3.1 Einfluss von Staub.....	7
3.3.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit.....	7
3.4 Selbstreinigende und Anti-Reflektions-Beschichtungen	8
3.4.1 Selbstreinigende Beschichtungen	8
3.4.2 Antireflektierende Beschichtungen.....	8
3.5 Bankset Energy	8
4. Material und Methoden.....	9
4.1 Systemabgrenzung	9
4.2 Datengrundlage	11
4.2.1 Luftbild der Schweiz	11
4.2.2 GIS-Datensatz	11
4.2.3 Schienennetz der Schweiz	12
4.2.4 Schienennetz von Europa	12
4.3 Luftbildanalyse ausgewählter Strecken.....	13
4.3.1 Streckenauswahl	13
4.3.2 Luftbildanalyse	15
4.3.3 Beispielhafte Analyse	16
4.4 Extrapolation auf Europa.....	17
4.5 Umrechnung der Fläche in Energie	17

5.	Ergebnisse	18
5.1	Ergebnisse der Luftbildanalyse	18
5.2	Ergebnisse der GIS-Modellierung	19
5.2.1	Berechnungen zu den ausgewählten Strecken	19
5.2.2	Hochrechnung auf das Schienennetz der Schweiz	20
5.3	Ergebnisse der Extrapolation auf Europa	21
5.4	Andere Energieproduktionsformen & Bankset Energy	23
5.4.1	Offshore-Windparks in Deutschland	23
5.4.2	Speicherkraftwerk in der Schweiz	23
5.4.3	Kernkraftwerke der Schweiz.....	23
5.4.4	Vergleich zu den Angaben von Bankset Energy	23
6.	Diskussion.....	24
7.	Fazit	27
8.	Literaturverzeichnis.....	28
9.	Anhang	33
9.1	Schätzungen aus der Luftbildanalyse	33
9.2	Solarrechner und Berechnung der Energieproduktion	36
9.3	Eigenständigkeitserklärung	37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifikation von Photovoltaikmodulen nach Angmo et al. (2014)	5
Abbildung 2: Beispielhafte Gleisinfrastruktur (Bundesamt für Verkehr (BAV), 2018)	9
Abbildung 3: Schienennetz der Schweiz überlagert mit einer geographischen Gliederung der Schweiz (Eidg. Forschungsanstalt WSL, 2020; Schiedskommission im Eisenbahnverkehr SKE / RailCom, 2020).....	13
Abbildung 4: Ausgewählte Strecken für eine Luftbildanalyse (swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594), swissBOUNDARIES3D © 2020 swisstopo)	14
Abbildung 5: Stichprobenfläche zur beispielhaften Abschätzung der prozentualen PV-Bedeckung (swissTLM3D & SWISSIMAGE © 2019 swisstopo (DV033594)).....	16
Abbildung 6: Eingaben in den Solarrechner zur Berechnung der Energieproduktion pro m ² (Solar Campus GmbH, 2020)	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungsgrade von Siliziumzellen und -modulen nach Green et al. (2020).....	6
Tabelle 2: Wirkungsgrade von Siliziummodulen auf dem Markt	7
Tabelle 3: Berücksichtigte Faktoren für die Bestückung der Gleise mit PV-Modulen	11
Tabelle 4: Länge des Schweizer Schienennetz nach swissTLM3D und BFS.....	12
Tabelle 5: Verwendete Geodaten für das europäische Schienennetz (EuroGeographics, 2020)	12
Tabelle 6: Übersicht über die ausgewählten Strecken (swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594))	14
Tabelle 7: Erfasste Parameter jeder ausgewählten Strecke.....	16
Tabelle 8: Ergebnisse aus der Luftbildanalyse.....	18
Tabelle 9: Berechnung der PV-Fläche auf den Schwellen für die ausgewählten Strecken	18
Tabelle 10: Szenarien der PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km aus der Luftbildanalyse	19
Tabelle 11: Berechnete Werte der ausgewählten Strecken aus der GIS-Modellierung.....	19
Tabelle 12: Verwendete Szenarien der PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km	20
Tabelle 13: PV-Fläche und Energieproduktion für das Schienennetz der Schweiz	21
Tabelle 14: Vergleich der Schienennetze nach EGM und TLM.....	21
Tabelle 15: PV-Fläche und Energieproduktion des europäischen Schienennetzes.....	22
Tabelle 16: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Zürich - Luzern (IR 75)	33
Tabelle 17: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern	34
Tabelle 18: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Davos Dorf – Le Prese	35
Tabelle 19: Resultate des Solarrechners und Berechnung mittleren Energieproduktion m ²	36

Abkürzungsverzeichnis

BFS	Bundesamt für Statistik
EGM	EuroGlobalMap
GIS	Geoinformationssystem
GWh	Gigawattstunden
GWh/a	Gigawattstunden pro Jahr
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt-Peak
MWh	Megawattstunden
PV-Anlagen	Photovoltaik-Anlagen
PV-Fläche	Photovoltaik-Fläche
PV-Module	Photovoltaik-Module
STC	Standardtestbedingungen
TLM	swissTLM3D
TWh	Terrawattstunden
TWh/a	Terrawattstunden pro Jahr

Glossar

Air mass	Die Air mass definiert die direkte optische Weglänge für einen definierten Einfallswinkel durch die Erdatmosphäre.
Bankett	Das Bankett bildet den seitlichen Abschluss der Fahrbahn. Es besteht meist aus Kies oder einem Kiesgemisch und dient als Dienstweg, Abstellfläche, Aufwuchsbremse und Fluchtweg.
Böschung	Als Böschung werden die Grünflächen entlang von Gleisen ausserhalb des Gleisbereichs bezeichnet.
Geodaten	Geodaten sind digitale Informationen, welchen eine bestimmte räumliche Lage zugewiesen werden kann.
Gleis/Gleisanlage	Ein Gleis besteht aus Schienen, Schwelle und den Verbindungsmitteln. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Gleis und Gleisanlage gleichgesetzt.
Gleisinfrastruktur	Als Gleisinfrastruktur wird in dieser Arbeit das gesamte System, welches für den funktionalen Zugverkehr notwendig ist, bezeichnet.
Kunstabauten	Kunstabauten sind Brücken, Durchlässe, Stützmauern, Tunnel, Tröge, u.a.
Modul	Ein Modul besteht aus mehreren verbundenen PV-Zellen und bildet eine Einheit.
Oberbau	Der Oberbau ist ein zusammenfassender Begriff für die Schienen, Schwellen und das Schotterbett.
Puffer	Ein Puffer oder Buffer ist eine Zone definierten Abstands um ein Geoobjekt.
Schotterbett	Das Schotterbett oder Schotter besteht aus gebrochenen Steinen, welche für die Einbettung der Schwellen verwendet wird.
Schwellen	Auf den Schwellen sind die Gleise montiert. Sie verteilen deren Belastung auf das Schotterbett.

1. Einleitung

Der spürbar fortschreitende Klimawandel macht eine Umstellung weg von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren, klimafreundlicheren Energien unumgänglich. Viele Projekte bezüglich erneuerbaren Energien verzögern sich jedoch aufgrund von starker Opposition aus der lokalen Bevölkerung oder werden gar eingestellt (Devine-Wright & Batel, 2017; Upreti & Van Der Horst, 2004; Wolsink & Breukers, 2010). Betroffen davon ist vor allem die Windenergie, gefolgt von der Solarenergie (Picchi et al., 2019). Mit der Energiestrategie 2050, welche am 21. Mai 2017 vom Schweizer Stimmvolk angenommen wurde, sollen die erneuerbaren Energien weiter gefördert, der Energieverbrauch gesenkt und die Energieeffizienz gesteigert werden (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), 2017).

Mit der Energiestrategie 2050 verbunden ist auch der sukzessive Ausstieg aus der Kernenergie. Dieser hat zur Folge, dass bis 2035 eine Stromlücke von 25.2 Terrawattstunden (*TWh*) entsteht, welche bis 2050 auf 24.5 *TWh* sinken wird (Bundesamt für Energie (BFE), 2012). Diese Stromlücke soll zu einem grösstmöglichen Anteil durch erneuerbare Energiequellen gedeckt werden. Für den Restbetrag werden zusätzlich Gaskombikraftwerke benötigt. Mit einer optimalen Förderung kann bis 2050 eine Produktion von 24.2 *TWh* durch erneuerbare Energien erreicht werden, was 32 % des Verbrauchs der Schweiz entspricht. Da im Winter der Stromverbrauch grösser und gleichzeitig die Stromproduktion geringer ist als im Sommer, ist ein Ausbau der saisonalen Speicherkapazität erforderlich (Bundesamt für Energie (BFE), 2012, 2013b). Um die entstehende Stromlücke zu decken, ist als sowohl ein Ausbau der erneuerbaren Energien als auch die Erhöhung der Speicherkapazität notwendig. Sollen die Klimaziele erreicht werden, so braucht es zusätzliche Massnahmen, um den Energieverbrauch zu senken, die Effizienz von Energiesystemen zu erhöhen und die energetische Sanierung stark auszuweiten (Bundesamt für Energie (BFE), 2012, 2013b).

Es gibt verschiedene erneuerbare Energiequellen, die zur Deckung der Stromlücke in Frage kommen. Der wichtigste Energielieferant der Schweiz, der einen Anteil von 57 % an der inländischen Stromproduktion aufweist, ist die Wasserkraft (Bundesamt für Energie (BFE), 2020). Diese ist aber für die Deckung der Stromlücke wenig geeignet, da nur noch ein geringes Ausbaupotenzial vorhanden ist (Bundesamt für Energie (BFE), 2019). Bis 2050 ist ein Ausbau auf 38.6 Terrawattstunden pro Jahr (*TWh/a*) vorgesehen, was eine Steigerung von 2 *TWh/a* im Vergleich zu 2019 darstellt (Bundesamt für Energie (BFE), 2020). Eine weitere erneuerbare Energiequelle, welche in der Schweiz ein grosses Potenzial besitzt, ist die Windenergie. Die Schätzungen des nachhaltigen Potenzials bis 2050 reichen je nach berücksichtigten Parametern und getroffenen Annahmen von 1.4 *TWh/a* bis 30 *TWh/a* (Bundesamt für Energie (BFE), 2012; Meteotest, 2012; Suisse Éole, 2020), wobei 5 – 6 *TWh/a* bis 2050 aufgrund der fortschreitenden Technik als realistisch angesehen wird. Ein wichtiger Vorteil der Windenergie ist ihre saisonale Komplementarität zur Wasserkraft und der Solarenergie (EnergieSchweiz, 2020; Suisse Éole, 2020). Zwei Drittel der Stromproduktion von Windkraftwerken fällt in den Wintermonaten an, in denen auch der Strombedarf durch vermehrte Heizleistung und Beleuchtung grösser ist. Die Stromproduktion durch Solaranlagen und Wasserkraftwerke erfolgt vor allem vom Frühling bis in den Herbst (EnergieSchweiz, 2020), also bei geringerem Stromverbrauch, was eine saisonale Speicherung notwendig macht. Die Windenergie hat oft einen schweren Stand in der Schweiz. Das grösste Hindernis für deren Akzeptanz ist der visuelle Einfluss auf die umgebende Landschaft (Maehr et al., 2015; Sæþórsdóttir & Ólafsdóttir, 2020; Van Grieken & Dower, 2017). Die Einstellung gegenüber Windenergie scheint sich jedoch positiv entwickelt zu haben. Jones und Eiser (2009; 2010) zeigten vor einem Jahrzehnt, dass zwar eine grundsätzlich positive Haltung gegenüber Windenergie vorhanden war, die Unterstützung für ein spezifisches Projekt jedoch meist negativer ausfiel. Auch weitere Autoren kamen zum Schluss, dass eine

allgemeine Unterstützung von Windenergie nicht automatisch zur Unterstützung von spezifischen Projekten führt (Krohn & Damborg, 1999; Wolsink, 2007). Diese Unsicherheit bezüglich der Akzeptanz stellt eine weitere Herausforderung bei der Implementierung von Windenergieanlagen dar (Maehr et al., 2015; Scottish Natural Heritage, 2014). Neuere Erkenntnisse zeigen jedoch, dass in den letzten Jahren die meisten Abstimmungen über konkrete Windenergieprojekte positiv ausgefallen sind, wobei ausschlaggebend war, dass die lokale Bevölkerung in die Projekte miteinbezogen wurde (EnergieSchweiz, 2020; Suisse Éole, 2020). Hemmend wirkt in der Schweiz des Weiteren die lange Realisierungszeit, welche zu Verzögerungen in der Ausschöpfung des Potenzials führt (Bundesamt für Energie (BFE), 2012). Potenzielle Standorte für die Windenergie sind in der Schweiz durch den Landschaftsschutz, die Topografie und die Siedlungsdichte auf wenige Regionen mit hohen durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten beschränkt (Bundesamt für Energie (BFE), 2012; Kienast et al., 2014). Diese Regionen haben oftmals ein grosses Potenzial für Tourismus und Erholung, was zu entsprechenden Konflikten führt (Kienast et al., 2014).

Neben der Energiegewinnung aus Wind hat auch jene aus der Sonne ein sehr grosses Potenzial in der Schweiz. Die Energiemenge, welche in einer Stunde durch die Sonneneinstrahlung auf der Erdoberfläche ankommt, entspricht dem globalen Energiebedarf von etwa einem Jahr (Chen et al., 2008; Goetzberger et al., 2003; Gueymard, 2004). Diese Strahlung kann mittels Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) nutzbar gemacht und in Strom umgewandelt werden (Polman et al., 2016; Tsoutsos et al., 2005). EnergieSchweiz (2020) geht davon aus, dass sich die Schweiz durch eine Kombination aus Wind-, Solar- und Wasserstrom mit einheimischem und CO₂-freiem Strom versorgen kann. Allein durch Photovoltaikanlagen auf relativ konfliktarmen Dächern könnte 30 % der vom Atomausstieg verursachten Stromlücke gedeckt werden (Kienast et al., 2017).

Ein bedeutender Nachteil von erneuerbaren Energien ist, dass im Vergleich zu Kernkraftwerken deutlich mehr Fläche benötigt wird, um die gleiche Menge an Strom zu produzieren (Bundesamt für Energie (BFE), 2013a). In einem dichtbesiedelten Land wie der Schweiz müssen daher Trade-offs zwischen erneuerbaren Energien, vor allem bei PV-Anlagen, und anderen Landnutzungen eingegangen werden, wobei es wesentlich ist, den Qualitätsverlust der Landschaft so gering wie möglich zu halten oder ganz zu vermeiden (Egli et al., 2017; Salak et al., 2019). Dessen scheint sich die Bevölkerung der Schweiz bewusst zu sein, denn sie präferiert bestimmte Regionen für die Entwicklung von erneuerbaren Energien. So zeigt sich die Tendenz, dass Landschaften mit einer Vorbelastung wie Siedlungen oder von Tourismus geprägte Gebiete für die Entwicklung von erneuerbaren Energien bevorzugt werden und Landschaften wie die Voralpen, die Alpen und der Jura, welche als naturnah empfunden werden, eher vor einer solchen Entwicklung geschützt werden. Diese Präferenz sollte bei der Planung berücksichtigt werden (Salak et al., 2019).

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, bereits belastete Flächen mit erneuerbaren Energien auszustatten, auch in Fällen, in denen diese eine geringere Effizienz aufweisen als unbelastete Flächen. Dafür eignen sich besonders PV-Anlagen. Mit ihnen kann in Kombination mit bereits vorhandener Infrastruktur ohne zusätzlichen Flächenbedarf Solarstrom produziert werden (Nordmann et al., 2012). Beispiele für Installationen auf bereits beanspruchten Flächen sind PV-Anlagen auf Hausdächern/-Fassaden oder PV-Anlagen integriert in Schallschutzwänden (Vallati et al., 2015). 1989 wurde letztere Variante mit einer Leistung von 110 Kilowatt – Peak (*kWp*) als weltweit erste Anlage in der Schweiz an der A13 bei Domat/Ems auf einer Länge von 828 m installiert (Nordmann et al., 2002; Rhiienergie AG, 2017). 2017 wurde diese Anlage saniert und liefert seither 260 *kWp* – genug Strom für 92 Haushalte (Rhiienergie AG, 2017). Schallschutz mit integrierten Photovoltaikmodulen (PV-Modulen) scheint allerdings nicht sehr gefragt zu sein, da in der Schweiz bisher nur 4 Projekte realisiert wurden und davon 3 vor 2000

durchgeführt wurden (TNC Consulting AG, 2020). Es scheint so, als könnte sich diese Art der Flächennutzung nicht über die Pilotphase hinaus etablieren.

Die Gleisinfrastruktur stellt ebenfalls eine bereits belastete Fläche dar, auf der PV-Module montiert werden könnten. Hier soll diese Bachelorarbeit ansetzen und mithilfe einer Luftbild- und GIS-Analyse das Potenzial für das Schweizer Schienennetz berechnen und einen Vergleich zum europäischen Schienennetz ziehen. Eine Abschätzung des Potenzials ist aktuell, da es bereits verschiedene Teststrecken in der Schweiz und in Deutschland gibt. Die Firma hinter diesen Pilotprojekten ist Bankset Energy (pv magazine, 2018; solarbaba, 2018). Es sind jedoch noch keine Resultate aus diesen Pilotprojekten öffentlich zugänglich, welche in diese Arbeit einfließen könnten.

2. Fragestellung und Zielsetzung

Zu Photovoltaikmodulen auf Gleisanlagen gibt es nur vereinzelte Pilotprojekte, deren exakte Daten jedoch nicht zugänglich sind. Zudem ist auch keine Potenzialrechnung für solche Anlagen bekannt, so dass die Grössenordnung der Energiemenge, welche hier potenziell gewonnen werden könnte, unbekannt ist.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, das Potenzial von PV-Anlagen auf der Gleisinfrastruktur in der Schweiz und in Europa zu ermitteln und einen Vergleich zu anderen Energieträgern zu ziehen. Dadurch soll der Wissensstand zur Anwendungsmöglichkeit von PV-Anlagen verbessert werden und eine Grundlage für eine mögliche praktische Anwendung geschaffen werden.

In dieser Arbeit gilt es, folgende übergeordnete Fragestellung zu beantworten:

- Welches Potenzial hat das Schienennetz für Photovoltaikanlagen?

Im Zuge dieser Fragestellung wird versucht, folgende detailliertere Fragen zu beantworten:

- Wie gross ist die Fläche auf Gleisanlagen in der Schweiz und in Europa, welche potenziell mit PV-Modulen bestückt werden kann?
- Welche Energiemenge kann mit dieser Fläche in der Schweiz und europaweit generiert werden?
- Wie sieht diese Fläche im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieformen aus?
- Kann der Energiebedarf des Schweizer Bahnbetriebs mit dieser Fläche gedeckt werden?

Bewusst weggelassen werden Fragen zu den Anschaffungs- und Instandhaltungskosten von PV-Anlagen auf Gleisen, da diesbezüglich keine Informationen verfügbar waren. Dies schränkt den Vergleich mit anderen erneuerbaren Energieformen insofern ein, dass nicht aus einem Kostenpunkt heraus argumentiert werden kann.

3. Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik bei der Photovoltaiktechnologie erörtert. Dabei steht nicht eine technische Analyse von Modulen oder Zellen im Vordergrund, sondern vielmehr deren Effizienz und die Unterschiede zwischen den verschiedenen Typen und Herstellern. Diese Erkenntnisse dienen als Grundlage für spätere Berechnungen und zur Ausarbeitung verschiedener Szenarien.

3.1 Klassifikation der Photovoltaikzellen

Die verschiedenen Technologien, welche bei der Photovoltaik zum Einsatz kommen, lassen sich grob einteilen in anorganische und organische Verbindungen (Angmo et al., 2014). Photovoltaikzellen aus Silizium, welche zu den anorganischen Verbindungen gehören, machen über 90 % des Marktes aus (Lai et al., 2017; Smith et al., 2012). Sie lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Monokristalline Zellen bestehen aus einem Kristall und machen 35 % der Siliziumzellen auf dem Markt aus. Polykristalline Zellen bestehen aus mehreren Kristallen und machen 65 % der Siliziumzellen auf dem Markt aus (Smith et al., 2012). Der Hauptgrund für diese unterschiedlichen Anteile liegt darin, dass polykristalline Zellen einfacher und kostengünstiger herzustellen sind (Wang et al., 2017).

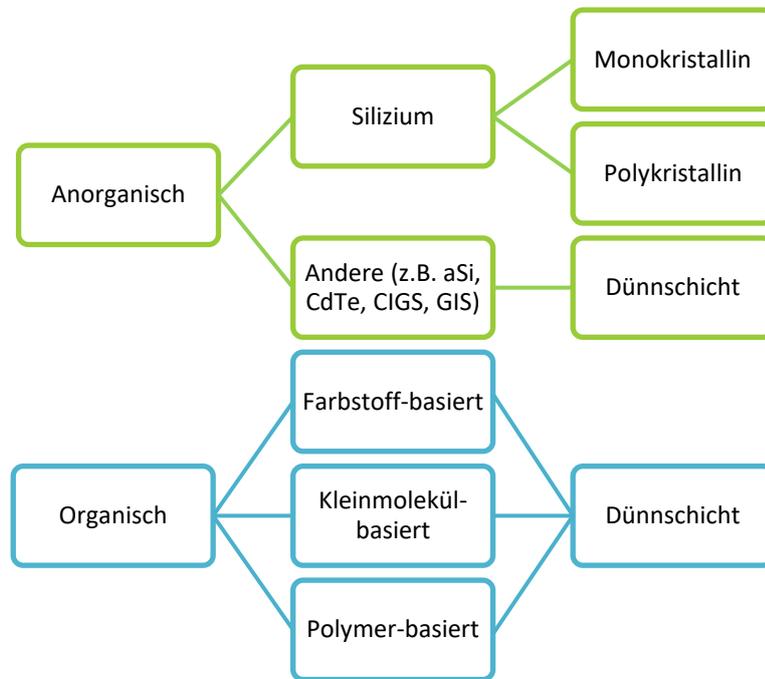


Abbildung 1: Klassifikation von Photovoltaikmodulen nach Angmo et al. (2014)

Auf Photovoltaikzellen aus organischen Verbindungen wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, weil es sich bei sämtlichen Vertretern um Dünnschichtmodule handelt, welche zur Montage auf Gleisanlagen aufgrund der fehlenden Robustheit nicht geeignet sind. Gleiches gilt für die Dünnschichtmodule aus anorganischen Verbindungen, welche für gebäudeintegrierte Anwendungen, beispielsweise an Fassaden, eingesetzt werden (Lai et al., 2017).

3.2 Effizienz von Photovoltaikmodulen

Der Wirkungsgrad oder die Effizienz gibt an, wie viel der eingehenden Energie von einer Zelle, einem Modul oder einer Anlage in Strom umgewandelt wird (Photovoltaik.org, 2020b). Die Effizienz von PV-Modulen, welche auf dem Markt verfügbar sind, unterscheidet sich teilweise stark von den Rekorderffizienzen der PV-Module aus der Forschung. Für diese Diskrepanz sind hauptsächlich zwei Faktoren verantwortlich. Zum einen werden die vergleichsweise hohen Wirkungsgrade aus der Forschung meist kleinflächig mit speziellen Labortechniken erzielt, welche für die Massenproduktion zu teuer oder unpraktikabel sind. Zum anderen bestehen die Module auf dem Markt aus grossflächigeren Zellen, die untereinander verbunden sind. Dadurch entstehen zusätzliche Widerstände, was zu Stromverlusten führt. Eine weitere Diskrepanz zwischen der Praxis und Laborbedingungen entsteht dadurch, dass die Solarmodule in der Praxis in den seltensten Fällen unter den Standardtestbedingungen (STC) betrieben werden. Die Sonneneinstrahlung variiert im Laufe eines Tages und je nach Jahreszeit. Weiter erwärmen sich die Module durch die Sonneneinstrahlung, was zu einem Wirkungsgradverlust von 1 bis 2 % im Vergleich zu den STC-Wirkungsgraden, welche bei 25°C gemessen werden, führt. Je länger ein Photovoltaikmodul im Einsatz ist, desto grösser wird der Unterschied bezüglich seines STC-Wirkungsgrad, da im Laufe der Zeit eine Verringerung des Wirkungsgrads durch die Degradation der Zellen und der Zellverbindungen vonstattengeht (Polman et al., 2016).

Die Effizienz von PV-Modulen ist auch von den verwendeten Materialien abhängig. Der Vorteil des tieferen Preises von polykristallinen Modulen ist mit dem Nachteil einer geringeren Effizienz verglichen mit monokristallinen Modulen verbunden. Die Ursache dafür ist unter anderem, dass eine höhere Konzentration an Verunreinigungen vorhanden ist (Polman et al., 2016). Auch die Glasschicht, welche die Zellen vor Schäden durch äussere Faktoren schützen soll, hat einen Einfluss auf die Effizienz. Dickeres Glas ist widerstandsfähiger, hat dafür aber eine geringere Lichtdurchlässigkeit als dünnes Glas, welches weniger widerstandsfähig ist (Sarkin et al., 2020). Eine dicke Glasschicht erhöht also die Widerstandsfähigkeit, senkt aber die Effizienz des Moduls.

3.2.1 Effizienz von Photovoltaikmodulen aus der Literatur

Genauere Angaben zu den Wirkungsgraden verschiedenster Photovoltaikzellen und -module sind in den neusten Tabellen (Version 55) von Green et al. (2020) zu finden. In dieser Arbeit werden nur monokristalline und polykristalline Module berücksichtigt. Bei den Siliziumzellen fand in den vergangenen Jahren nur eine absolute Verbesserung der Wirkungsgrade von 0.04 bis 0.09 % pro Jahr statt (Polman et al., 2016). In Tabelle 1 sind die neusten Wirkungsgrade für Zellen und grossflächige Module aus Silizium aufgeführt und es erfolgt ein Vergleich der Effizienz zu Version 45 der Tabellen von Green et al. (2015).

Tabelle 1: Wirkungsgrade von Siliziumzellen und -modulen nach Green et al. (2020)

	Typ	Effizienz [%]	Fläche [cm ²]	Vergleich zu Green et al. Version 45 (2015)
Siliziumzelle	Monokristallin	26.7	79	+1.1 % Effizienz
Siliziumzelle	Polykristallin	23.2	247	+2.4 % Effizienz
Siliziummodul	Monokristallin	24.4	13'117	+2.0 % Effizienz
Siliziummodul	Polykristallin	20.4	14'818	+1.9 % Effizienz

Die hier aufgelisteten Wirkungsgrade wurden unter den Standardbedingungen gemessen. Diese sind definiert als eine Einstrahlung von 1000 Watt, 25°C und eine Air Mass von 1.5. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, gab es sowohl bei den Zellen als auch bei den Modulen in monokristalliner und polykristalliner Ausführung eine Verbesserung der Effizienz. Die Erhöhung des Wirkungsgrades ist ein wesentlicher Faktor für die Kostensenkung (Polman et al., 2016).

3.2.2 Effizienz von Photovoltaikmodulen auf dem Markt

Die Angaben zu den Wirkungsgraden von PV-Modulen auf dem Markt wurden verschiedenen Webseiten und Anbietern entnommen. Die hier festgehaltenen Wirkungsgrade sind dabei nicht abschliessend. Je nach Webseite und Anbieter variieren die Angaben zur Effizienz der Module mehr oder weniger stark. Ein Faktor ist dabei der Preis, da neuere Modelle mit einer höheren Effizienz meist auch teurer sind als ältere Modelle mit einer geringeren Effizienz. Das Herstellungsland spielt bei der Preisstruktur ebenfalls eine wichtige Rolle. So sind PV-Module aus Ländern wie China oder Taiwan oft günstiger als vergleichbare Angebote beispielsweise aus Deutschland (Photovoltaik.org, 2020a).

Tabelle 2: Wirkungsgrade von Siliziummodulen auf dem Markt

	Typ	Effizienz [%]	Quelle
Siliziummodul	Monokristallin	20 – 22	photovoltaik.org (2020b)
Siliziummodul	Polykristallin	15 – 20	photovoltaik.org (2020b)
Siliziummodul	Monokristallin	15 – 22.8	EnergySage (2020)
Siliziummodul	Polykristallin	14.2 – 18.65	EnergySage (2020)
Siliziummodul	Monokristallin	20	Wegatech (2020)
Siliziummodul	Polykristallin	12 – 16	Wegatech (2020)

Die in Tabelle 2 angegebenen Wirkungsgrade wurden von den Herstellern unter Standardbedingungen gemessen, was die Angaben mit jenen aus Kapitel 3.2.1 vergleichbar macht. Es ist zu beobachten, dass der Unterschied zu den Rekordmodulen aus der Forschung nicht konstant ist. Durchschnittlich ist eine Abweichung von ca. –4 % zu beobachten. Je nach Hersteller kann der Unterschied kleiner oder grösser ausfallen.

3.3 Einfluss der Witterung auf die Effizienz von Modulen

In der Praxis beeinflusst die Witterung die Effizienz und somit auch die Leistung von PV-Modulen. Die Leistung einer Anlage kann durch Staub, Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit beeinflusst werden (Mekhilef et al., 2012). Damit eine möglichst hohe Effizienz gewährleistet ist, müssen die Photovoltaikzellen kühl bleiben und es gilt, Staub und Dreck von der Oberfläche der Module fernzuhalten (Meral & Diner, 2011; Park et al., 2010).

3.3.1 Einfluss von Staub

Staub beeinflusst die Leistung einer Anlage, indem weniger Licht die Zellen erreicht und somit auch weniger Strom produziert werden kann. Die Ablagerung von Staub wird durch verschiedene Parameter wie die Oberflächenbeschaffenheit, den Neigungswinkel, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit beeinflusst (Kaldellis & Kapsali, 2011; Mani & Pillai, 2010). Auf geneigten Modulen sammelt sich weniger Staub an als auf flachen. Zudem haben gröbere Staubpartikel einen kleineren Effekt auf die Effizienz als feinere Staubpartikel (Al-Hasan, 1998). Mit steigender Windgeschwindigkeit erhöht sich die Staubverbreitung, aber es lagert sich auch weniger Staub auf den Modulen ab (Goossens & Van Kerschaever, 1999).

3.3.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Effizienz dadurch, dass mit steigender Windgeschwindigkeit die Temperaturen der Solarzellen sinken, was zu einer höheren Effizienz führt. Die Zelltemperatur ist ein sehr sensibler Parameter bezüglich der Leistung, wobei die Temperaturabhängigkeit je nach Zelltyp unterschiedlich gross ist. Mono- und polykristallinen Solarzellen weisen mit steigenden Temperaturen einen geringeren Effizienzverlust auf als Solarzellen aus anderen Materialien (Mekhilef et al., 2012).

3.4 Selbstreinigende und Anti-Reflektions-Beschichtungen

Durch eine Strukturierung der Moduloberfläche und eine antireflektierende Beschichtung kann die Leistung von PV-Modulen weiter verbessert werden (Iyengar et al., 2010). Mit speziellen Beschichtungen kann zusätzlich der Leistungsverlust durch Verschmutzung gering gehalten werden (Sarkin et al., 2020).

3.4.1 Selbstreinigende Beschichtungen

Verunreinigungen auf der Oberfläche von PV-Modulen reduzieren direkt deren Leistung (Mani & Pillai, 2010; Sarver et al., 2013). Um der Verschmutzung durch Staub oder andere Partikel entgegenzuwirken, kann auf die oberste Schicht der Module eine selbstreinigende Beschichtung aufgetragen werden, welche das Entfernen von Verschmutzungen mit ihren hydrophoben oder hydrophilen Eigenschaften ermöglicht (Sarkin et al., 2020). Für solche Beschichtungen wird meistens Titandioxid (TiO_2) verwendet. Für diese Beschichtungen gibt es auch alternative Möglichkeiten (Parlaktuna et al., 2013; Sarkin et al., 2020).

3.4.2 Antireflektierende Beschichtungen

Ein gewisser Leistungsverlust entsteht auch bei sauberen PV-Modulen. Dies geschieht, weil die Sonnenstrahlen beim Auftreffen auf die oberste Glasschicht der Module gebrochen und zu einem kleinen Teil reflektiert werden. Die Photovoltaikzellen werden also nicht vom gesamten Sonnenlicht erreicht, was zu einem Leistungsverlust führt. Die Effizienz eines PV-Moduls kann erhöht werden, wenn dieser Verlust durch Reflexion minimiert werden kann (Lu & Yao, 2007; Yamada et al., 2001). Eine Möglichkeit, dies zu tun, besteht darin, das Deckglas mit einer Anti-Reflexionsbeschichtung zu beschichten, welche den Anteil an reflektierten Sonnenstrahlen reduziert und so die Effizienz erhöht (Sarkin et al., 2020). Um gleichzeitig den Verlust durch Staub oder anderen Verschmutzungen zu minimieren, kann eine Kombination mit einer selbstreinigenden Beschichtung erfolgen (Parlaktuna et al., 2013).

3.5 Bankset Energy

Bankset Energy hat bereits vereinzelte Pilotversuche zu PV-Modulen auf Gleisschwellen durchgeführt (solarbaba, 2018). Die Resultate dieser Pilotversuche wurden bisher nicht veröffentlicht. In persönlichen Mitteilungen in Form von Emails wurden einige Erkenntnisse geteilt. Bankset Energy gehen davon aus, dass ihre Module 20 % effizienter sind als andere Systeme (Buri, 2020; Isoti, 2020), was einer Effizienz von ca. 24 % entspricht, wenn man von einer durchschnittlichen Effizienz von 20 % ausgeht. Der Effizienzverlust durch Staub und andere Verschmutzungen scheint bei ihrem System sehr gering zu sein, da sie eine Reinigung durch Regen als ausreichend bewerten (Isoti, 2020). Patrick Buri (2020) geht davon aus, dass das Potenzial des Schweizer Schienennetzes für ihr System über 400 Megawatt liegt. Bankset Energy ist in der Lage, eine Länge von 100 km innert 6 Monaten mit ihren Solarmodulen auszustatten (Isoti, 2020). Pro Kilometer Gleisanlage, welche mit ihren Solarmodulen bestückt ist, können 91.6 MWh Strom produziert werden (Bankset Energy, 2019). Die Solarmodule sind nach eigenen Angaben sehr robust, so dass bisher bei den Teststrecken noch keine Mängel aufgetreten sind (Buri, 2020).

4. Material und Methoden

Um die Fragestellung dieser Arbeit beantworten zu können, werden verschiedene Materialien und Methoden verwendet. Zum einen wird eine Analyse von Luftbildern ausgewählter Zugstrecken vorgenommen. Zum anderen wird mittels kartografischer Daten im Programm "ArcGIS Pro 2.4.0" (Esri, 2019) eine Abschätzung des Potenzials vorgenommen. Die Kombination der Ergebnisse ermöglicht eine Extrapolation von der Schweiz auf ganz Europa. Das genaue Vorgehen wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

4.1 Systemabgrenzung

Um Klarheit zu schaffen, welche Teile der Gleisinfrastruktur in dieser Arbeit miteinbezogen werden, gilt es, die Grenzen des untersuchten Systems festzuhalten. Zur Veranschaulichung, um welchen Teil der Gleisinfrastruktur es geht, dient Abbildung 2 aus den Gleisaushubrichtlinien des Bundesamtes für Verkehr (BAV) (2018).

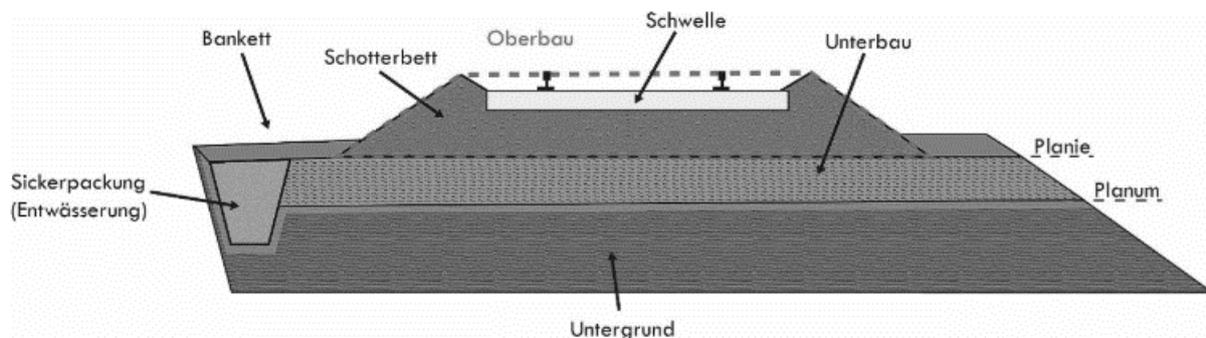


Abbildung 2: Beispielhafte Gleisinfrastruktur (Bundesamt für Verkehr (BAV), 2018)

Für die Bestückung mit PV-Modulen werden folgenden Teile der Gleisinfrastruktur in Betracht gezogen:

- Schwelle
- Schotterbett
- Bankett

Die Schwellen dienen als Verankerungspunkte für die einzelnen Schienen. Zusammen mit den Verbindungsmitteln und den Schienen bilden sie ein Gleis (Bundesamt für Verkehr (BAV), 2018). Schwellen werden in verschiedenen Ausführungen eingesetzt. Im Schweizer Schienennetz werden Holz-, Beton-, und Stahlschwellen eingesetzt (Wikipedia, 2020). In dieser Arbeit wird nicht zwischen den verschiedenen Materialien unterschieden. Es wird angenommen, dass auf jeder Schwelle die gleiche Fläche mit PV-Modulen bestückt werden kann.

Die Schwellen werden in das Schotterbett eingelassen, welches aus Gesteinskörnern mit einem Korngrössendurchmesser von 22.4 mm bis 80 mm besteht (Bundesamt für Verkehr (BAV), 2018). Das Schotterbett dient der elastischen Lagerung der Gleise und erlaubt eine Korrektur der Gleislage, sollte dies nötig sein (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2001). Für diese Arbeit wird das Schotterbett für eine mögliche Bestückung von PV-Modulen zwar berücksichtigt, die schräg abfallenden Seiten werden aus methodentechnischen Gründen jedoch nicht als solche wahrgenommen. Dies bedeutet, dass die berücksichtigte Fläche kleiner ist als die tatsächliche Fläche des Schotterbetts.

An das Schotterbett grenzt das Bankett, welches den seitlichen Abschluss der Fahrbahn bildet. Es besteht aus Kies und Kiesgemisch und dient unter anderem als Dienstweg, Fluchtweg, Abstellfläche und Wuchshindernis für die Vegetation (Bundesamt für Verkehr (BAV), 2018). Zusätzlich wirkt das Bankett

stabilisierend auf das Schotterbett. Der begehbare Teil des Banketts ist in der Regel mindestens 60 – 90 *cm* breit. Das Bankett bildet die Grenze der Gleisanlage zur Böschung (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2001). In dieser Arbeit wird das Bankett als Fläche für PV-Module (PV-Fläche) aufgrund der angewendeten Methode miteinbezogen, da sich die Unterscheidung vom Schotterbett als schwierig gestaltet.

4.2 Datengrundlage

Als Datengrundlage für spätere Berechnungen dienen ein Luftbild der Schweiz, ein GIS-Datensatz und Daten zu den Schienennetzen von der Schweiz und Europa.

4.2.1 Luftbild der Schweiz

Das in dieser Arbeit verwendete Luftbild der Schweiz hat eine Auflösung von 25 cm (swisstopo, 2019a). Da das Luftbild nur für einige spezifische Strecken benötigt wird, wurde es auf diese mit einem Puffer von 20 m links und rechts der Strecken zugeschnitten, um die Datengrösse möglichst klein zu halten. Je nach Region ist das Luftbild auf dem Stand von 2014-2016. Dies bedeutet, dass unter Umständen die Schlüsse, welche aus dem Luftbild gezogen wurden, nicht mehr aktuell sind.

4.2.2 GIS-Datensatz

Die für die Bestimmung des Potenzials verwendeten Geodaten stammen aus dem swissTLM3D (swisstopo, 2019b). Daraus wurden durch Prof. Dr. Felix Kienast verschiedene Layer entnommen, miteinander verrechnet und in einen GIS-Datensatz zusammengeführt. Dieser dient als Grundlage für die Potenzialberechnung des Schweizer Schienennetzes. Die aus diesem Datensatz verwendeten Geodaten werden in Tabelle 3 aufgeführt. Es handelt sich dabei um Faktoren, welche auf das Bestückungspotenzial von Gleisanlagen mit PV-Modulen einwirken.

Tabelle 3: Berücksichtigte Faktoren für die Bestückung der Gleise mit PV-Modulen

Faktor	Ausprägung	Beschreibung
Gleise	1 = Bahnlinie gepuffert mit PV-Breite je nach Schienenspur 0 = keine Bahnlinie	Die Linie, welche ein Gleis darstellt, wurde mit der verwendbaren Breite für PV-Module zwischen den Schienen gepuffert. Dabei wurde für Normalspur 1'135 mm, für Schmalspur 700 mm und für Kleinbahnen 200 mm verwendbare Breite angenommen. Ausgenommen sind Strassenbahnen, Museumsbahnen, Standseilbahnen, Zahnradbahnen, Kunstbauten und Strecken, die ausser Betrieb sind.
Bahnhöfe und viele Schienen	1 = innerhalb einer 50 m · 50 m Rasterzelle entlang des Schienennetzes, in der die Gesamtlänge der Gleise grösser als 250 m ist 0 = ausserhalb einer solchen Zelle	Simuliert Bahnhöfe oder sehr viele Schienen nebeneinander. Die Überlegung dahinter ist, dass es an diesen Standorten viele Weichen oder andere Störfaktoren gibt, was für PV-Module ungeeignet ist.
Gebäude	1 = Gebäude in 30 m Puffer vorhanden 0 = kein Gebäude in 30 m Puffer vorhanden	Gibt an, ob innerhalb des mit 30 m gepufferten Faktors "Gleise" Gebäude stehen. Diese sind für PV-Module auf Gleisen hinderlich, da sie möglicherweise während eines signifikanten Zeitraums Schatten werfen.
Strassen	1 = Strassen in 30 m Puffer vorhanden 0 = keine Strassen in 30 m Puffer vorhanden	Beinhaltet alle Strassen gepuffert mit der ihnen zugeordneten Strassenbreite innerhalb eines 30 m Puffers vom Faktor "Gleise". Dies simuliert Strassenquerungen und Bahnübergängen, welche für die Montage von PV-Modulen ungeeignet sind.
Brücken	1 = innerhalb des 20 m Puffer von Strassen > 2 m auf Kunstbauten 0 = ausserhalb des 20 m Puffer von Strassen > 2 m auf Kunstbauten	20 m Puffer um alle Strassen mit einer Breite > 2 m auf Kunstbauten innerhalb eines 30 m Puffers vom Faktor "Gleise". Diese werfen Schatten, weshalb nahe gelegene Standorte ungeeignet für PV-Module sind. Kleinere Wege werden vernachlässigt.

4.2.3 Schienennetz der Schweiz

Das Schienennetz der Schweiz wurde aus dem swissTLM3D (TLM) von swisstopo entnommen. Dabei wurde das Schienennetz für Strassenbahnen, Museumsbahnen, Standseilbahnen, Zahnradbahnen und jener Teil, der ausser Betrieb ist, nicht berücksichtigt, da diese Bestandteile des Schienennetzes nicht im Datensatz von Europa vorhanden sind und mit diesen Anpassungen eine Vergleichbarkeit gegeben ist. In Tabelle 4 ist die Länge des Schweizer Schienennetzes ersichtlich.

Tabelle 4: Länge des Schweizer Schienennetz nach swissTLM3D und BFS

Quelle	Schienennetzlänge	Bemerkung
swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594)	11'474 km	Mehrspurige Strecken einzeln erfasst
Bundesamt für Statistik (BFS) (2019)	5'196 km	Mehrspurige Strecken zusammengefasst

Die Differenz liegt grösstenteils darin begründet, dass die Angabe durch das BFS zwei- und mehrspurige Streckenabschnitte nur als einspurige Streckenabschnitte zählt und somit nicht die Länge aller Gleise angegeben wird, sondern vielmehr die Länge der Routen (Bundesamt für Statistik (BFS), 2019). Bei beiden Angaben werden Strecken, welche ausser Betrieb sind, nicht berücksichtigt.

4.2.4 Schienennetz von Europa

Die Geodaten für das Schienennetz von Europa wurden von eurogeographics.org bezogen, einer Webseite, welche verschiedene Geodaten von Europa im Datensatz "EuroGlobalMap" (EGM) zur freien Verfügung stellt (EuroGeographics, 2020). In Tabelle 5 sind die in dieser Arbeit verwendeten Geodaten des EGM aufgelistet. Bezüglich der Zugstrecken sind in diesem Datensatz alle Strecken vorhanden, welche regelmässig genutzt werden, was auch wichtige Industriestrecken einschliesst. Nicht miteinbezogen wurden in das EGM U-Bahn- und Strassenbahnlinien innerhalb von Stadtgebieten, Bahnhöfe und einzelne Zugstrecken, die kürzer sind als 2 km. Eine Zugstrecke wird unabhängig von der Anzahl der Gleise durch eine Linie dargestellt (EuroGeographics, 2019). Das europäische Schienennetz hat im Datensatz EGM eine Gesamtlänge von 229'888 km.

Tabelle 5: Verwendete Geodaten für das europäische Schienennetz (EuroGeographics, 2020)

Ordner	Geodatabase	Feature Class	Bemerkung
Countries	EuroGlobalMap_2019_CHLI.gdb	RailrdL	Beinhaltet die Eisenbahnstrecken der Schweiz und Lichtenstein. Nur Einträge mit den Attributen "FCsubtype = Railway" und "ICC = CH" wurden berücksichtigt.
FullEurope	EuroGlobalMap_2019.gdb	RailrdL	Beinhaltet die Eisenbahnstrecken aller europäischen Länder. Nur Einträge mit "FCsubtype = Railway" wurden berücksichtigt.

und Davos Dorf – Le Prese. Die geographische Lage der Strecken ist in Abbildung 4 eingezeichnet. Die Spezifikationen der Strecken sind in Tabelle 6 festgehalten.

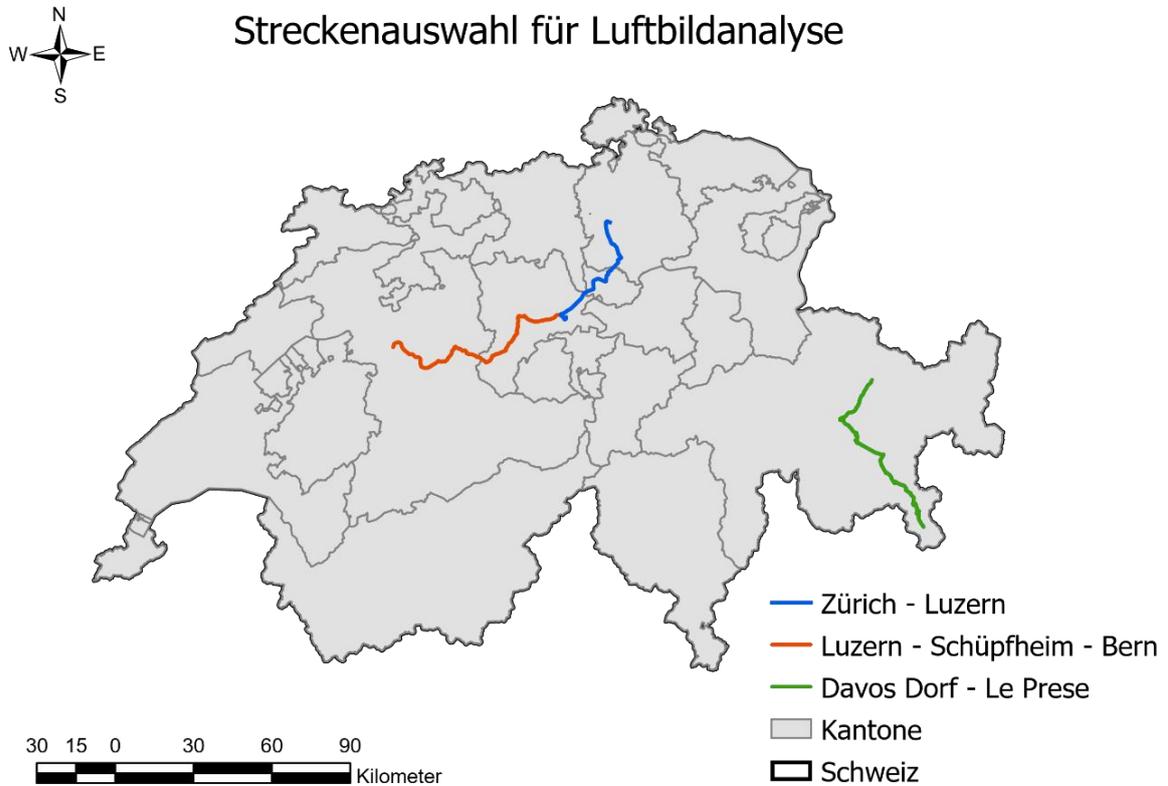


Abbildung 4: Ausgewählte Strecken für eine Luftbildanalyse (swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594), swissBOUNDARIES3D © 2020 swisstopo)

Da diese Strecken nicht mit statistischen Methoden ausgewählt wurden, ist eine genaue Repräsentation des Schienennetzes nicht möglich. Die Strecke in den Alpen wurde bewusst länger gewählt, um die Diversität der Alpenlandschaften möglichst gut mit nur einer Strecke abzudecken.

Tabelle 6: Übersicht über die ausgewählten Strecken (swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594))

Strecke	Länge	Startpunkt	Endpunkt	Region	Spur
Zürich – Luzern (IR 75)	57.6 km	Zürich HB	Luzern, Bahnhof	Mittelland	Normalspur
Luzern – Schüpfheim – Bern	95.6 km	Luzern, Bahnhof	Bern, Bahnhof	Mittelland, Voralpen	Normalspur
Davos Dorf – Le Prese	102.5 km	Davos Dorf, Bahnhof	Le Prese, Stazione	Alpen, Alpensüdseite	Schmalspur

4.3.2 Luftbildanalyse

Weil eine Luftbildanalyse über die gesamten Streckenlänge nicht praktikabel ist, werden die festgelegten Strecken stichprobenartig analysiert. Die potenzielle Fläche für PV-Module wird für jede Stichprobenfläche abgeschätzt, woraus sich die potenzielle Fläche für die gesamte Strecke berechnen lässt.

4.3.2.1 Abschätzung des PV-Potenzials in den Stichprobenflächen

Jede der ausgewählten Strecken wird vom Startpunkt aus bis zum Endpunkt in Segmente mit einer Länge von 1 km eingeteilt, wobei am Ende jeder Strecke ein Restsegment entsteht, welches für diese Analyse nicht berücksichtigt wird. In den letzten 100 m jedes Segments wird auf einer Breite von 30 m (15 m vom Mittelpunkt der Strecke auf jede Seite) abgeschätzt, welcher Prozentsatz dieser Stichprobenfläche (3'000 m²) mit PV-Anlagen bedeckt werden kann. Die Schätzungen für die Segmente aller ausgewählten Strecken sind in Anhang 9.1 zu finden. Als für PV-Module geeignete Flächen werden dabei die Schwellen, das Schotterbett und das Bankett angenommen (Kapitel 4.1). Um die Breite der Stichprobe auch in den Kurven konstant zu halten, wird die Stichprobenbreite mittels eines insgesamt 30 m breiten Puffers, welcher entlang der gesamten Länge der ausgewählten Strecke erzeugt wurde, festgelegt. Die Stichprobenlänge von 100 m wird dabei mit dem Werkzeug "Messen" in ArcGIS Pro (Esri, 2019) bestimmt. Wird der prozentuale Bedeckungsgrad aller Stichprobenflächen über die gesamte Strecke aufsummiert und durch die Anzahl der Stichprobenflächen dividiert, so ergibt sich daraus der durchschnittliche Bedeckungsgrad der Strecke. Daraus lässt sich die potenzielle Fläche für PV-Module berechnen.

Durch die Stichprobenbreite von 30 m entstehen Ungenauigkeiten in Bereichen von grösseren Bahnhöfen oder mehreren Gleisen, da diese möglicherweise nicht komplett erfasst werden. Diese Ungenauigkeit kann durch den Umstand vergrössert werden, dass die ausgewählte Strecke, welche als Mittellinie für die Stichprobenfläche verwendet wird, oft nicht dem mittleren Gleis entspricht, sondern einem Gleis eher am Rand. Eine Möglichkeit, solche Ungenauigkeiten zu vermindern, wäre eine Stichprobenbreite von 40 m oder 50 m zu wählen. Dies hätte aber zur Folge, dass die Fehler bei den geschätzten Deckungsgraden grösser werden bei Stichprobenflächen, in welchen sich nur zwei oder drei Gleise befinden. Ein Grund dafür ist, dass es schwerer fällt, den Anteil kleinerer Flächen an der Gesamtfläche abzuschätzen als den Anteil von grösseren Flächen. Da Bahnhöfe und viele Gleise einen deutlich geringeren Anteil an der gesamten Gleislänge haben als zwei oder drei parallele Gleise nebeneinander, wird angenommen, dass der Schätzfehler bei einer breiteren Stichprobenfläche grösser ist als der Fehler, der bei einer Breite von 30 m im Bereich von Bahnhöfen und vielen parallelen Gleisen entsteht. Zudem gibt es in diesen Bereichen oftmals viele Weichen, weshalb der Einsatz von Solarzellen nicht sinnvoll ist und dadurch ein möglicher Schätzfehler in diesem Bereich weniger ins Gewicht fällt.

Um einen Vergleich zu den Ergebnissen aus dem GIS-Datensatz ziehen zu können, wird für die Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern zusätzlich noch der prozentuale Bedeckungsgrad für den Fall geschätzt, dass PV-Module nur auf den Gleisschwellen montiert werden. Durch den Vergleich zur Schätzung der Fläche inklusive der Schotterbetten und Bankette lässt sich ein Faktor berechnen, welcher einen Vergleich aller Strecken mit den Ergebnissen aus den Geodaten möglich macht.

4.3.2.2 Berechnung der potenziellen Fläche für PV-Module

Aus dem durchschnittlichen Bedeckungsgrad lässt sich durch Multiplikation mit der Fläche des 30 m-Puffers die potenzielle Fläche für PV-Module auf der Länge dieser Strecke bestimmen. Dabei werden alle Gleise, welche sich im Puffer befinden, mitabgeschätzt. Zur Ermittlung der Fläche für die Anzahl PV-Module pro Kilometer Gleisanlage, ist es deshalb notwendig, die Länge aller Gleise im Puffer zu berücksichtigen. Eine Liste, der für jede der ausgewählten Strecken erfassten Parametern, ist in Tabelle 7 festgehalten. Für die Berechnungen wurde Excel 365 verwendet (Microsoft Corporation, 2018).

Tabelle 7: Erfasste Parameter jeder ausgewählten Strecke

Parameter	Beschreibung
Länge der Strecke [km]	Gibt die Länge der ausgewählten Strecke an.
# Stichproben	Gibt die Anzahl der Stichproben an. Pro Kilometer wird eine Stichprobe genommen.
Pufferfläche [m ²]	Direkt von der Attributtabelle des Puffers in ArcGIS Pro ablesbar.
Gleislänge in der Pufferfläche [km]	Gibt die Länge aller Gleise in der Pufferfläche an. Wird für die PV-Fläche pro km Gleis benötigt. Kann mit dem Werkzeug "Lagebezogen auswählen" in ArcGIS Pro berechnet werden.
durchschn. % PV-Bedeckung [%]	Entspricht dem Mittelwert aller geschätzten % PV-Bedeckungen.
PV-Fläche gesamte Strecke [m ²]	Ergibt sich aus der Multiplikation der Pufferfläche mit der durchschnittlichen % PV-Bedeckung. Entsteht aus der Luftbildanalyse.
PV-Fläche pro Gleis-km [m ² /km]	Entspricht dem PV-Flächenpotenzial, welches durchschnittlich pro Gleiskilometer vorhanden ist.

4.3.3 Beispielhafte Analyse

Zur Veranschaulichung des Erfassungsprozesses während der Luftbildanalyse wird im Folgenden beispielhaft eine Stichprobenfläche betrachtet. Die Abschätzung des Potenzials erfolgt dabei nur grob. Um den Schattenwurf von Kunstbauten, wie beispielsweise Brücken, zu berücksichtigen, wird ein zusätzlicher Abstand eingeführt. Die festgelegte Länge der Stichprobe von 100 m wird stets der ausgewählten Strecke entlang gemessen. Abbildung 5 zeigt die hier besprochene Stichprobenfläche.



Abbildung 5: Stichprobenfläche zur beispielhaften Abschätzung der prozentualen PV-Bedeckung (swisTLM3D & SWISSIMAGE © 2019 swisstopo (DV033594))

Das rote Rechteck entspricht der Stichprobenfläche, welche in der Breite durch die rot gestrichelten Linien des 30 m-Puffers begrenzt ist. Die feine grüne Linie stellt die ausgewählte Strecke dar. An diesem Beispiel ist das Problem der dezentralen Strecke gut sichtbar (Kapitel 4.3.2.1). Weil es sich bei der ausgewählten Strecke (grüne Linie) nicht um das mittlere Gleis handelt, sind im oberen Teil der Stichprobe nicht alle Gleise enthalten, während im unteren Teil der Stichprobe Flächen enthalten sind, die nicht mehr zur Gleisanlage gehören. Da dieser Teil nicht zum Schienennetz gehört, wird er zusammen mit der Brücke im gelben Polygon mit einer PV-Bedeckung von 0 % erfasst. Zur Brücke wurde auf jeder Seite ca. 5 m dazugerechnet, da durch den Schattenwurf in diesem Bereich PV-Module nicht sinnvoll sind. Die blauen Polygone beinhalten Weichen oder nahe beieinanderliegende Schienen, was spezielle PV-Module erfordern würde und daher als unwirtschaftlich erachtet wird. Somit bleibt in dieser Stichprobe nur eine

kleine Fläche, welche potenziell mit PV-Modulen bedeckt werden könnte. Das Potenzial in dieser Stichprobenfläche wird auf ca. 10 % geschätzt, was einer Fläche von 300 m^2 entspricht. Es wird nur die mögliche Bedeckung der Schienen, des Schotterbetts und der Bankette berücksichtigt, Gebäudedächer von Bahnhöfen etc. werden nicht zur geschätzten PV-Fläche gezählt.

4.4 Extrapolation auf Europa

Die Extrapolation auf Europa erfolgt durch die aus der Luftbildanalyse hervorgegangene durchschnittliche PV-Fläche pro Gleiskilometer. Das TLM enthält nur Geodaten für die Schweiz und Lichtenstein. Für eine Extrapolation auf das europäische Schienennetz muss also ein anderer Datensatz verwendet werden. Im Falle dieser Arbeit handelt es sich dabei um den Datensatz "EuroGlobalMap", kurz EGM (eurogeographics, 2020). Um zu prüfen, ob die Ergebnisse aus dem TLM auf das EGM übertragbar sind, wird die Korrelation der beiden Datensätze bezüglich der Länge der ausgewählten Strecken und des gesamten Schienennetzes der Schweiz untersucht. Falls die Korrelation ungenügend ausfällt, müssen allfällige Korrekturfaktoren miteinbezogen werden. Die Fehler, welche aufgrund der Geodaten entstehen, wie beispielsweise Ungenauigkeiten in den Koordinatensystemen und in den digitalen Schienennetzen, werden nicht berücksichtigt. Es handelt sich bei der Extrapolation in dieser Arbeit nur um eine grobe Schätzung, welche die Grössenordnung für das Potenzial von Photovoltaik auf Gleisanlagen bestimmen soll.

4.5 Umrechnung der Fläche in Energie

Die Umrechnung der Fläche, welche sich aus den Berechnungen ergibt, in die mittels Photovoltaik produzierte Energie erfolgt mithilfe eines Solarrechners (Solar Campus GmbH, 2020). Die Berechnungen, welche aufgrund der Daten aus dem Solarrechner gemacht wurden, sind in Anhang 9.2 zu finden. Aus ihnen ergibt sich eine jährlich produzierte Energiemenge von 190 kWh/m^2 . Dabei wird ein Wirkungsgrad der PV-Module von 21 % angenommen. Diese Annahme deckt sich mit den Informationen über die Wirkungsgrade von monokristallinen PV-Modulen aus Kapitel 3.2.2. In der berechneten Fläche wird noch nicht berücksichtigt, dass die Schwellen in einem bestimmten Abstand zueinander verbaut sind. Zur Berücksichtigung dieses Abstands fliesst in die Berechnung der potenziellen Energiemenge noch ein Faktor ein. Dieser Faktor unterscheidet sich je nach Fläche, welche für die Bestückung mit PV-Modulen berücksichtigt wurde. Da in dieser Arbeit zwei Szenarien bezüglich der berücksichtigten Fläche angeschaut werden, gibt es entsprechend auch zwei verschiedene Formeln. Aus der Formel (1) lässt sie die jährlich produzierte Energie von PV-Modulen auf den Schwellen berechnen. Die Formel (2) berechnet die jährlich produzierte Energiemenge von PV-Modulen auf den Schwellen, dem Schotterbett und den Banketten.

$$(1) E_S = \frac{1}{3} \cdot \text{Fläche} [\text{m}^2] \cdot 190 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$$

$$(2) E_G = \frac{2}{3} \cdot \text{Fläche} [\text{m}^2] \cdot 190 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$$

E_S jährlich auf Schwellen produzierte Energie [kWh/a]

E_G jährlich auf Schwellen, Schotterbett und Bankett produzierte Energie [kWh/a]

Für PV-Module auf den Schwellen wird ein Faktor von $\frac{1}{3}$ angenommen. Der Faktor $\frac{2}{3}$ ergibt sich aus der Überlegung, dass die Schwellen die Hälfte der berücksichtigten Fläche ausmachen und die andere Hälfte dieser Fläche (Schotterbett und Bankett) zu 100 % bedeckt werden kann.

5. Ergebnisse

Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen dazu, die Grössenordnung für das Potenzial von Photovoltaik auf Gleisanlagen abzuschätzen. Auf eine statistische Analyse der Ergebnisse wird verzichtet, da dies den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit überschreitet.

5.1 Ergebnisse der Luftbildanalyse

Die Ergebnisse aus der Luftbildanalyse der ausgewählten Strecken sind in Tabelle 8 ersichtlich. Die hier gewonnen Erkenntnisse werden für spätere Berechnungen und die Extrapolation verwendet. Für die Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern wird zusätzlich noch die Fläche für den Fall geschätzt, dass PV-Module nur auf den Schwellen montiert werden (Kapitel 4.3.2.1).

Tabelle 8: Ergebnisse aus der Luftbildanalyse

Parameter	Zürich – Luzern	Luzern – Schüpfheim – Bern	Davos Dorf – Le Prese
Länge der Strecke [km]	57.6	95.6	102.5
# Stichproben	57	95	102
Pufferfläche [m ²]	1'726'672	2'865'528	3'065'844
Gleislänge in Pufferfläche [km]	146.11	168.31	125.95
durchschn. % PV-Bedeckung [%]	25.00	25.68	14.66
PV-Fläche gesamte Strecke [m ²]	431'668	735'988	449'357
PV-Fläche pro Gleis-km [m ² /km]	2'954	4'373	3'568
durchschn. % PV-Bedeckung auf Schwellen [%]	-	4.7	-
PV-Fläche gesamte Strecke auf Schwellen [m ²]	-	135'575	-
PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m ² /km]	-	806	-

Aus der Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern lässt sich nun ein Faktor berechnen, der es auch für die anderen zwei Strecken möglich macht, die Erkenntnisse aus der Luftbildanalyse in weitere Berechnungen einfließen zu lassen. Der Faktor (3) berechnet sich aus der angegebenen Formel.

$$(3) \text{ Faktor} = \frac{\text{PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m}^2/\text{km]}}{\text{PV-Fläche pro Gleis-km [m}^2/\text{km]}} = \frac{806 \text{ m}^2}{4373 \text{ m}^2} = 0.1842$$

Mithilfe dieses Faktors werden für die übrigen zwei ausgewählten Strecken die Parameter für PV-Module nur auf den Schwellen berechnet (Tabelle 9). Dies erfolgt durch die Multiplikation der Ergebnisse, bei denen die Schwellen, das Schotterbett und das Bankett berücksichtigt werden, mit dem Faktor (3).

Tabelle 9: Berechnung der PV-Fläche auf den Schwellen für die ausgewählten Strecken

Parameter	Zürich – Luzern	Luzern – Schüpfheim – Bern	Davos Dorf – Le Prese
PV-Fläche gesamte Strecke auf Schwellen [m ²]	79'517	135'575	82'775
PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m ² /km]	544	806	657

Aus diesen Angaben der ausgewählten Strecken kann nun der Mittelwert für die potenzielle PV-Fläche auf den Schwellen pro Gleiskilometer berechnet werden, welcher für die Hochrechnung auf das gesamte Schienennetz der Schweiz und die Extrapolation auf das europäische Schienennetz verwendet wird. Um eine gewissen Bandbreite abzudecken, wird sowohl ein gewichteter als auch ein ungewichteter Mittelwert berechnet. Der ungewichtete Mittelwert ist das arithmetische Mittel der potenziellen PV-Fläche auf Schwellen pro Gleiskilometer der drei Strecken aus Tabelle 9. Die unterschiedlichen Längen der Strecken werden dabei nicht berücksichtigt. Beim gewichteten Mittelwert wird für jede der ausgewählten Strecken die potenziellen PV-Fläche auf Schwellen pro Gleiskilometer mit dem Anteil der Streckenlänge an der summierten Länge aller drei Strecken gewichtet. Das arithmetische Mittel dieser nach der Länge der Strecken gewichteten Werte bildet den gewichteten Mittelwert. Diese Mittelwerte werden als Szenario 1 respektive 2 bezeichnet (Tabelle 10).

Tabelle 10: Szenarien der PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km aus der Luftbildanalyse

Szenario	Beschreibung	PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m^2/km]
Szenario 1	Ungewichteter Mittelwert	669
Szenario 2	Gewichteter Mittelwert	687

5.2 Ergebnisse der GIS-Modellierung

Für die GIS-Modellierung wurde der in Kapitel 4.2.2 beschriebene Datensatz verwendet. Um festzustellen, wie repräsentativ die ausgewählten Strecken für den Datensatz sind, wurden die PV-Fläche für die ausgewählten Strecken berechnet. Anschliessend erfolgte die Hochrechnung auf das Schweizer Schienennetz und die Extrapolation auf das europäische Schienennetz.

5.2.1 Berechnungen zu den ausgewählten Strecken

Eine Berechnung der PV-Fläche für die ausgewählten Strecken, welche auf dem GIS-Datensatz basiert, zeigt, wie gross der Unterschied zwischen dem berechneten Potenzial und dem aus der Luftbildanalyse ermittelten Potenzial auf diesen Strecken ausfällt. Ferner liefert diese Berechnung ein weiteres Szenario für die Extrapolation. Zusammen mit den Szenarien aus der Luftbildanalyse sollte so ein realistischer Bereich abgedeckt werden. Da die GIS-Berechnungen nur für die PV-Fläche auf den Schwellen durchgeführt wurden, wird für einige Parameter der Umrechnungsfaktor (3) verwendet, um die PV-Fläche für die gesamte berücksichtigte Fläche zu berechnen.

Tabelle 11: Berechnete Werte der ausgewählten Strecken aus der GIS-Modellierung

Parameter	Zürich – Luzern	Luzern – Schüpfheim – Bern	Davos Dorf – Le Prese
Länge der Strecke [km]	57.6	95.6	102.5
# Stichproben	57	95	102
Pufferfläche [m^2]	1'726'672	2'865'528	3'065'844
Gleislänge in Pufferfläche [km]	146.11	168.31	125.95
PV-Fläche gesamte Strecke auf Schwellen [m^2]	80'162	129'523	62'707
Hochgerechnete PV-Fläche gesamte Strecke [m^2]	435'173	703'136	340'417
Hochgerechnete PV-Fläche pro Gleis-km [m^2/km]	2'978	4'178	2'703
PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m^2/km]	549	770	498
Unterschied zur Luftbildanalyse [%]	0.81	- 4.67	- 32.00

Die Berechnungen zeigen, dass der Unterschied für die Strecken Zürich – Luzern und Luzern – Schüpfheim – Bern gering ist. Für die Strecke Davos Dorf – Le Prese ist der Unterschied mit 32 % relativ gross.

Die GIS-Modellierung liefert das Szenario 3 für die Extrapolation. Dieses entspricht dem arithmetischen Mittel der PV-Fläche auf den Schwellen pro Gleiskilometer der drei ausgewählten Strecken. Auf einen gewichteten Mittelwert aus der GIS-Modellierung wird verzichtet, da dieser den durch die anderen Szenarien bereits abgedeckten Bereich nicht beeinflusst. Die drei verwendeten Szenarien sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Verwendete Szenarien der PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km

Szenario	Beschreibung	PV-Fläche auf Schwellen/Gleis-km [m^2/km]
Szenario 1	Ungewichteter Mittelwert	669
Szenario 2	Gewichteter Mittelwert	687
Szenario 3	GIS-Berechnungen der Strecken	605

5.2.2 Hochrechnung auf das Schienennetz der Schweiz

Die Hochrechnung auf das Schienennetz der Schweiz dient primär dazu, festzustellen, ob die Luftbildanalyse ähnliche Ergebnisse liefert wie die GIS-Modellierung mit den Annahmen aus Kapitel 4.2.2. Da eines der Szenarien mit dem GIS-Datensatz berechnet wurde, kann auch überprüft werden, ob die Auswahl der Strecken repräsentativ für das gesamte Schienennetz ist. Für die Länge des Schienennetzes wird die Angabe von 11'471.72 km verwendet (Kapitel 4.2.3), welche auf dem TLM beruht. Zur Flächenberechnung werden die Formeln (4) und (5) verwendet.

$$(4) F_{S,i} = \text{Szenario } i \cdot 11471.72 \text{ km}$$

$$(5) F_{G,i} = \frac{\text{Szenario } i \cdot 11471.72 \text{ km}}{0.1842}$$

$F_{S,i}$ potenzielle PV-Fläche auf Schwellen für das Schienennetz der Schweiz für *Szenario i*

$F_{G,i}$ potenzielle PV-Fläche auf Schwellen, Schotterbett, Bankett für das Schienennetz der Schweiz für *Szenario i*

Szenario i ausgewähltes Szenario, $i = \{1,2,3\}$

Um aus der PV-Fläche die produzierte Energiemenge pro Jahr zu berechnen, werden die Formeln (1) und (2) verwendet.

Tabelle 13: PV-Fläche und Energieproduktion für das Schienennetz der Schweiz

Szenario	PV-Fläche [m ²]	Energieproduktion pro Jahr [GWh/a]	Unterschied zur GIS-Modellierung [%]
PV-Fläche nach GIS-Modellierung	6'999'467	443	-
PV-Fläche der Schweiz auf Schwellen (Szenario 1)	7'676'360	486	9.67
PV-Fläche der Schweiz auf Schwellen (Szenario 2)	7'885'463	499	12.66
PV-Fläche der Schweiz auf Schwellen (Szenario 3)	6'946'315	440	- 0.76
PV-Fläche der Schweiz inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 1)	41'672'317	5'278	-
PV-Fläche der Schweiz inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 2)	42'807'469	5'422	-
PV-Fläche der Schweiz inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 3)	37'709'155	4'776	-

Wie in Tabelle 13 ersichtlich, ist für eine Bestückung der Schwellen mit PV-Modulen in der Schweiz eine Energieproduktion von 440 – 499 *GWh/a* zu erwarten. Dabei ist die Differenz zwischen der GIS-Modellierung und Szenario 3 mit 0.76 % sehr gering. Dies bestätigt, dass die Strecken repräsentativ für das Schweizer Schienennetz nach TLM sind. Die Szenarien 1 und 2 weichen mit 9.67 % und 12.66 % stärker von der GIS-Modellierung ab. Werden für die Bestückung mit PV-Modulen auch das Schotterbett und das Bankett berücksichtigt, so erhöht sich die potenzielle Energieproduktion des Schienennetzes auf 4'776 – 5'422 *GWh/a*.

5.3 Ergebnisse der Extrapolation auf Europa

Damit eine Extrapolation von den Ergebnissen des Schweizer Schienennetzes auf das europäische Schienennetz sinnvoll ist, wird zuerst festgestellt, inwieweit die beiden verwendeten Datensätze, das TLM und das EGM, vergleichbar sind. Da das EGM auch die Schweiz beinhaltet, ist es möglich für die ausgewählten Strecken die entsprechende Längenangabe aus dem TLM und dem EGM miteinander zu vergleichen. Dieser Vergleich ist in Tabelle 14 zusammen mit einem Vergleich des gesamten Schienennetzes der Schweiz aus dem TLM und dem EGM ersichtlich.

Tabelle 14: Vergleich der Schienennetze nach EGM und TLM

Strecke	Länge im TLM [m]	Länge im EGM [m]	Übereinstimmung [%]
Zürich – Luzern	57'593	57'000	98.97
Luzern – Schüpfheim – Bern	95'601	94'568	98.92
Davos Dorf – Le Prese	102'520	98'618	96.19
Gesamte Schweiz	11'474'720	4'018'505	35.02

Für die ausgewählten Strecken ist die Übereinstimmung hoch, was für eine Extrapolation spricht. Bezüglich des gesamten Schienennetzes der Schweiz ist die Übereinstimmung mit 35.02 % jedoch tief. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass im EGM mehrspurige Gleisanlagen nur als einspurige erfasst werden. Eine Berechnung von zwei Varianten soll dies ausgleichen. In Variante A werden die drei definierten Szenarien direkt auf die Länge des europäischen Schienennetzes nach dem EGM angewendet. In Variante B wird die Schienennetzlänge aus dem EGM mit einem gewählten Streckfaktor von 2.5 multipliziert. Daraus ergeben sich für das europäische Schienennetz die in Tabelle 15 festgehaltenen PV-Flächen und Energiemengen. Zu beachten ist, dass die Fläche in *km²* und die Energieproduktion in *TWh/a* angegeben

ist. Die Gesamtlänge des europäischen Schienennetzes beläuft sich im Datensatz EGM auf 229'887 km (Kapitel 4.2.4).

Tabelle 15: PV-Fläche und Energieproduktion des europäischen Schienennetzes

Variante	Szenario	PV-Fläche [km ²]	Energieproduktion pro Jahr [TWh/a]
Variante A (ohne Streckfaktor)	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 1)	154	9.7
	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 2)	158	10.0
	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 3)	139	8.8
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 1)	835	105.8
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 2)	858	108.6
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 3)	755	95.7
Variante B (mit Streckfaktor 2.5)	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 1)	384	24.4
	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 2)	395	25.0
	PV-Fläche von Europa auf Schwellen (Szenario 3)	348	22.0
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 1)	2'087	264.4
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 2)	2'144	271.6
	PV-Fläche von Europa inkl. Schotterbett & Bankett (Szenario 3)	1'889	239.2

Anzumerken ist, dass die Berechnungen für das europäische Schienennetz aufgrund der verfügbaren Daten nur grob erfolgten. Die produzierte Energiemenge der Variante A beläuft sich bei einer Bestückung der Schwellen mit PV-Modulen auf 8.8 – 10 TWh/a. Werden für Variante A zusätzlich noch die Schotterbetten und Bankette mit PV-Modulen ausgestattet, wird eine Energiemenge von 95.7 – 108.6 TWh/a erreicht. Bei Variante B werden jährlich von PV-Modulen auf Schwellen 22.0 – 25.0 TWh produziert. Schliesst die PV-Fläche Schotterbetten und Bankette mit ein, so ist für Variante B eine Energieproduktion von 239.2 – 271.6 TWh/a zu erwarten.

5.4 Andere Energieproduktionsformen & Bankset Energy

In diesem Kapitel werden die berechneten Energiemengen aus den Kapiteln 5.2.2 und 5.3 in Kontext gesetzt und ein Vergleich zu anderen Formen der Energieproduktion gezogen. Ausserdem wird die Angabe von Bankset Energy aus Kapitel 3.5 mit den berechneten Energiemengen verglichen.

5.4.1 Offshore-Windparks in Deutschland

Deutschland hat in den letzten zehn Jahren über 20 Offshore-Windparks in der Nord- und Ostsee erbaut und in Betrieb genommen. Insgesamt lieferten diese Windenergieanlagen im Jahr 2019 24 *TWh* Strom nach Deutschland (IWR, 2020). Das entspricht in etwa der Stromlücke, welche in der Schweiz durch den Ausstieg aus der Atomkraft entsteht (Kapitel 1). Das Schienennetz der Schweiz produziert bei einer Bestückung der Schwellen, Schotterbetten und Bankette 21.5 % dieser Energiemenge. Werden nur die Schwellen bestückt, so beläuft sich die Energieproduktion auf 2 % von den Windparks in Deutschland im Jahr 2019.

5.4.2 Speicherkraftwerk in der Schweiz

Die Wasserkraft ist in der Schweiz von grosser Bedeutung (Kapitel 1). Gleichzeitig hat sie aber auch grosse Einflüsse auf die Landschaft. Ein besonders grosses Kraftwerk ist das Speicherkraftwerk Cleuson-Dixence, welches sich im Val d'Hérémence im Kanton Wallis bei Sitten befindet. Die Jahresproduktion beläuft sich auf 2 *TWh*. Diese Energiemenge wird mithilfe des Stausees Grand Dixence produziert, welcher eine Fläche von 4.04 *km*² besitzt (Alpiq Holding AG, 2020). Eine Bestückung des Schienennetzes der Schweiz mit PV-Modulen auf den Schwellen, Schotterbetten und Banketten liefert die zwei- bis zweieinhalbfache Energiemenge des Speicherkraftwerks. Es könnte also eine Landschaftsfläche von 8 – 10 *km*² gespart werden bei gleicher Energieproduktion.

5.4.3 Kernkraftwerke der Schweiz

Im Jahr 2018 produzierten die Kernkraftwerke Beznau-1 und Beznau-2 eine Nettoenergiemenge von 2.46 *TWh* und 3.03 *TWh* (swissnuclear, 2019). Da die Schweiz den Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen hat (Bundesamt für Energie (BFE), 2012), müssen Alternativen gefunden werden, um diese zu ersetzen. Diese zwei Kernkraftwerke können bei einer Ausstattung nach Szenario 2 für Schwellen, Schotterbetten und Bankette durch PV-Anlagen ersetzt werden.

5.4.4 Vergleich zu den Angaben von Bankset Energy

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, gibt es bereits ein Unternehmen, welches PV-Module auf Gleisschwellen testet. Bankset Energy geht davon aus, dass pro Kilometer Gleisanlage, welche mit ihren Solarmodulen bestückt ist, 91.6 *MWh/a* produziert werden kann (Bankset Energy, 2019). Für das Schienennetz der Schweiz ohne Kunstbauten nach dem TLM ergibt dies eine Energieproduktion von ca. 950 *GWh/a*. Dies entspricht dem Doppelten der Energiemenge, die aus den Berechnungen dieser Arbeit für PV-Module auf den Schwellen hervorging.

6. Diskussion

Die Luftbildanalyse ist aufgrund der Auflösung und der kleinen Fläche der Schwellen nicht praktikabel, um deren Potenzial für PV-Module direkt abzuschätzen. Vielmehr muss eine Schätzung für eine grössere, gut abgrenzbare Fläche gemacht werden. In dieser Arbeit entspricht diese grössere Fläche der Kombination aus Oberbau und Bankett der Gleisinfrastruktur. Dies verringert die Präzision der Luftbildanalyse und führt leicht zu einer Überschätzung, da kleinere Hindernisse nicht erkennbar sind. Die Luftbildanalyse ist daher nur sinnvoll, um einen Vergleich zum verwendeten Modell zu haben. Für genauere Berechnungen, als sie in dieser Arbeit durchgeführt wurden, sollte ein Modell verwendet werden statt einer Luftbildanalyse, da sie für eine solche Anwendung zu ungenau ist. Die Strecke Davos Dorf – Le Prese ist im Vergleich zu den anderen ausgewählten Strecken zu lang. Eine lange Strecke in den Alpen ist vertretbar, da so die Diversität dieser Landschaft besser abgebildet wird. Durch das Hinzufügen weiterer Strecken im Mittelland kann erreicht werden, dass die geographische Verteilung des Schienennetzes in den ausgewählten Strecken wieder repräsentiert wird. Weitere Strecken für die Luftbildanalyse hätten jedoch den Rahmen dieser Arbeit gesprengt. Der Faktor (3) beruht allein auf den Schätzungen der Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern. Für andere Strecken verändert sich dieser Faktor vermutlich leicht, vor allem bei Schmalspurgleisen. Daraus resultiert eine gewisse Ungenauigkeit, welche in dieser Arbeit aber nicht weiterverfolgt werden konnte.

Die GIS-Modellierung erfolgte zu grossen Teilen auf der Basis des von Prof. Dr. Felix Kienast zur Verfügung gestellten Datensatzes. Im Rahmen dieser Arbeit konnten an diesem Datensatz keine Änderungen mehr durchgeführt werden. Vor allem das Kriterium "Strassen" führte dazu, dass Flächen als ungeeignet eingestuft wurde, welche aus Sicht der Luftbildanalyse als geeignet betrachtet wurden. Dies ist vermutlich eine Ursache für den relativ grossen Unterschied von 9.67 % resp. 12.66 % der Szenarien 1 & 2 zur Fläche aus der GIS-Modellierung. Diese These konnte bei einer stichprobenartigen Überprüfung auf der Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern bestätigt werden. Das Modell sollte für zukünftige Berechnungen also angepasst werden. Der grosse Unterschied zwischen der GIS-Modellierung und der Luftbildanalyse der Strecke Davos Dorf – Le Prese hat seine Ursache wahrscheinlich darin, dass es sich dabei um Schmalspurgleise handelt, was in der Luftbildanalyse nicht berücksichtigt wurde. Die Streckenauswahl für die Luftbildanalyse ist bezüglich der geographischen Verteilung nicht repräsentativ, jedoch ist sie für das Schienennetz aus dem TLM mit einer Übereinstimmung von 99 % für die PV-Fläche nach Szenario 3 repräsentativ. Wie realistisch eine Bestückung des Schotterbetts und des Banketts mit PV-Modulen ist, sei dahingestellt. Problematisch ist, dass zusätzliche Befestigungsmöglichkeiten geschaffen werden müssen, was bei den Schwellen nicht der Fall ist, da diese bereits Verankerungen für die Schienen besitzen. Zu beachten ist, dass angenommen wurde, dass die geeignete Fläche auch der Fläche entspricht, auf der PV-Module technisch montiert werden können. Die Möglichkeit besteht jedoch, dass Flächen aus Sicherheitsgründen, oder weil keine passenden PV-Module erhältlich sind, wegfallen.

Aus der Hochrechnung auf das Schienennetz der Schweiz ergibt sich bei einer Bestückung der Schwellen mit PV-Modulen eine mittlere Fläche von $7'502'713 \text{ m}^2$, welche jährlich eine mittlere Energiemenge von 475 GWh produziert. Die GIS-Modellierung ergab für das Schienennetz der Schweiz bei einer Bestückung der Schwellen eine nutzbare Fläche von $6'999'467 \text{ m}^2$ mit einer jährlichen Energieproduktion von 443 GWh . Dieser Unterschied ist nicht gleichbedeutend mit einer Überschätzung des Potenzials. Die Ursache für den tieferen Wert der GIS-Modellierung kann auch darin begründet liegen, dass das Modell Flächen ausschliesst, die eigentlich geeignet wären. Eine abschliessende Antwort zur Differenz kann in dieser Arbeit nicht gegeben werden. Wird sowohl der Oberbau als auch das Bankett der Gleisinfrastruktur schweizweit mit PV-Modulen bestückt, so entsteht eine mittlere Fläche von $40'729'647 \text{ m}^2$ oder 40.7 km^2 , welche rund $5'159 \text{ GWh/a}$ oder 5.159 TWh/a liefert. Die SBB und andere Bahnbetreiber

benötigten für den Bahnbetrieb im Jahr 2018 2'323 *GWh* Strom (SBB, 2020). Bei einer Bestückung der Schwellen mit PV-Modulen könnten folglich maximal 21 % des jährlichen Bedarfs gedeckt werden. Zum Vergleich, die Rhätische Bahn bezifferte 2019 einen Energieverbrauch von 97.6 *GWh* Strom (Rhätische Bahn, 2020). Ihr Strombedarf könnte mit einer Bedeckung von 22 % der Schwellen mit PV-Modulen gedeckt werden. Erfolgt die Bestückung auch auf den Schotterbetten und den Banketten, so kann der jährliche Bedarf für den gesamten Bahnbetrieb gedeckt werden.

Die Extrapolation auf das europäische Schienennetz wurde mit zwei Varianten durchgeführt. Bei Variante A wurden die Szenarien 1-3 direkt auf das Schienennetz nach dem EGM Datensatz angewandt. Bei Variante B wurde ein Streckfaktor von 2.5 verwendet, um die Zusammenfassung mehrerer paralleler Gleise zu einem Gleis zu berücksichtigen. Mithilfe des Streckfaktors wurde versucht, die eigentliche Länge des europäischen Schienennetzes zumindest in der Grössenordnung richtig abzuschätzen. Aufgrund der Unterschiede des Schweizer und des europäischen Schienennetzes bezüglich der Dichte ist dies aber nur bedingt möglich. Die Ergebnisse für das europäische Schienennetz liefern daher nur eine grobe Schätzung des Potenzials. Variante A ergab bei einer Bestückung der Schwellen mit PV-Modulen eine mittlere verwendbare Fläche von 150 *km²*, welche eine Energiemenge von ca. 9.5 *TWh/a* produzieren kann. Bei einer Bestückung des gesamten Oberbaus und des Banketts ergibt sich für Variante A eine mittlere verwendbare Fläche von 816 *km²*, was einer produzierten Energiemenge von 103.4 *TWh/a* entspricht. Variante B resultierte bei einer Bestückung der Schwellen in einer mittleren verwendbaren Fläche von 376 *km²* mit einer Energieproduktion von 23.8 *TWh/a*. Wird bei Variante B auch der Oberbau und das Bankett bestückt, so resultiert daraus eine mittlere verwendbare Fläche von 2'040 *km²*, welche eine Energiemenge von ca. 258.4 *TWh/a* produzieren kann. Dies entspricht ca. 9 % des gesamten Energieverbrauchs der EU im Jahr 2015 oder ca. 47 % des gesamten Energieverbrauchs von Deutschland im Jahr 2018. Wie bereits erwähnt, sind im EGM parallele Gleise in ein Gleis zusammengefasst. Aus diesem Grund ist die genaue Länge des europäischen Schienennetzes nicht bekannt, was sich wiederum auf die Genauigkeit der Resultate dieser Arbeit auswirkt. Die Energiemenge, welche von PV-Modulen auf den Schwellen produziert werden kann, liegt daher vermutlich im Bereich von 8.8 – 25 *TWh/a*. Gleiches gilt für die produzierte Energiemenge auf dem Oberbau und den Banketten. Positiv hervorzuheben ist, wie genau das EGM im Vergleich zum TLM bezüglich der Streckenlänge der ausgewählten Strecken selbst in der Region der Alpen ist. Geographisch ist jedoch keine vergleichbare Genauigkeit gegeben, weshalb sich das EGM für eine regionale Betrachtung nicht eignet.

Im Vergleich zu anderen Formen der Energieproduktion benötigt die Bestückung der Gleisanlage mit PV-Modulen deutlich mehr Fläche für die gleiche produzierte Energiemenge. Der grosse Vorteil von Photovoltaik liegt darin, dass sie auf bereits belastete Flächen angewendet werden kann und somit keine zusätzliche Belastung des Landschaftsbilds entsteht. Die Offshore-Windparks von Deutschland können viel Energie produzieren, ohne dabei für die Bevölkerung einen grossen Einfluss auf die Landschaft zu haben. Ein Vergleich mit dem Speicherkraftwerk Cleuson-Dixence zeigt, dass PV-Anlagen auf den Gleisen die 5-fache Fläche benötigen, um gleich viel Energie produzieren zu können. Zudem kann die Leistung deutlich weniger geregelt werden. Gleiches gilt für den Vergleich zu Kernkraftwerken, welche in der Schweiz durch den Ausstieg aus der Kernenergie jedoch keine Zukunft haben. Die Angaben von Bankset Energy liegen höher als die Ergebnisse dieser Arbeit, jedoch wurden bisher nur Pilotprojekte durchgeführt und keine grossflächigen Anlagen installiert (Kapitel 3.5). Ein wichtiger Punkt, der für PV-Anlagen auf Gleisen spricht, ist, dass so unbelastete Flächen, welche für die Energieproduktion vorgesehen sind, eingespart werden können und dass der Anteil an erneuerbaren Energien erhöht werden kann, ohne zusätzliche Flächen zu belasten. Es stellt sich jedoch die Frage, ob der Aufwand für die produzierte Energiemenge nicht zu gross ist.

Die grösste Limitierung dieser Arbeit ist, dass aufgrund der fehlenden Daten keine Kostenanalyse für PV-Anlagen auf den Gleisen durchgeführt werden konnte. Für die praktische Anwendung ist dies einer der wichtigsten Aspekte. Damit die Stärken und Schwächen des verwendeten Modells klarer werden und eine grössere Übereinstimmung mit der geographischen Verteilung des Schienennetzes der Schweiz erzielt werden kann, müssten mehr Strecken per Luftbild analysiert werden. Aus Zeitgründen war auch eine detailliertere GIS-Modellierung nicht möglich. Es ist nicht das Ziel dieser Arbeit, exakte Ergebnisse zu liefern. Vielmehr soll die Grössenordnung des Potenzials bestimmt werden. Für die Schweiz ist mit einem deutlich grösseren Zeitaufwand eine genauere Analyse möglich, da genaue Daten vorhanden sind.

Für zukünftige Arbeiten könnte eine genauere Analyse einzelner europäischer Länder durchgeführt werden, um die Grössenordnung der in dieser Arbeit berechneten Ergebnisse zu bestätigen oder zu korrigieren. Eine genaue Analyse einer spezifischen Strecke könnte deren genaues Potenzial bestimmen und so als Grundlage für eine praktische Umsetzung dienen. Um die GIS-Modellierung zu verbessern, könnten Interviews mit Experten und Verantwortlichen der Bahngesellschaften geführt werden, um herauszufinden, ob PV-Module auf Gleisanlagen überhaupt eine Option für sie sind und wie hoch die Kostengrenze liegt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, sich mit den Eigenschaften der Solarzellen für Gleisanlagen auseinanderzusetzen und zu erforschen, ob PV-Module für solche Anwendungen robuster und selbstreinigend sein müssen. Eine Abklärung bezüglich eines eingebauten Diebstahlschutzes für die Module ist von grosser Wichtigkeit.

7. Fazit

In dieser Arbeit wurde berechnet, wie gross das Potenzial für PV-Anlagen auf der Gleisinfrastruktur in der Schweiz und Europa ist. Dabei wurde unterschieden zwischen PV-Modulen nur auf den Schwellen und PV-Modulen auf den Schwellen, dem Schotterbett und den Banketten. Der Hauptgrund für diese Unterscheidung liegt darin, dass das Potenzial für PV-Module auf den Schwellen, dem Schotterbett und den Banketten in der Luftbildanalyse genauer abgeschätzt werden kann als das Potenzial für PV-Module auf den Schwellen. Eine Montage von PV-Modulen auf den Schwellen ist technisch einfacher machbar, da bereits Montagemöglichkeiten vorhanden sind. Für die Schotterbett und die Bankette müssten diese Möglichkeiten erst geschaffen werden, was einen grösseren zeitlichen und finanziellen Aufwand mit sich bringt.

Für das Schienennetz der Schweiz ergab diese Arbeit für PV-Module auf den Schwellen eine geeignete Fläche von $7'502'713 \text{ m}^2$, auf der eine Energieproduktion von 475 GWh/a möglich ist. Werden das Schotterbett und die Bankette zusätzlich berücksichtigt, so erhöht sich die für PV-Module geeignete Fläche auf $40'729'647 \text{ m}^2$, was einer potenziellen Energiemenge von $5'159 \text{ GWh/a}$ entspricht. Diese Energiemenge reicht aus, um den Energiebedarf des Bahnbetriebs in der Schweiz von $2'323 \text{ GWh}$ (im Jahr 2018) zu decken. Für das europäische Schienennetz liegt die potenzielle Fläche auf den Schwellen im Bereich von $150 - 375 \text{ km}^2$. Auf dieser Fläche kann eine Energiemenge von $9.5 - 23.8 \text{ TWh/a}$ produziert werden. Werden für das europäische Schienennetz das Schotterbett und die Bankette der Gleisinfrastruktur auch berücksichtigt, so liegt die für PV-Module geeignete Fläche im Bereich von $816 - 2'040 \text{ km}^2$, auf der eine Energiemenge von $103.4 - 258.4 \text{ TWh/a}$ produziert werden kann. Im Vergleich zu anderen Formen der Energieproduktion ist diese Anwendung der Photovoltaik bezüglich der produzierten Energiemenge pro Fläche oft deutlich unterlegen. Der grosse Vorteil der Photovoltaik liegt darin, dass PV-Module auf bereits belasteten Flächen montiert werden können.

Da im Rahmen dieser Arbeit keine statistische Analyse der Ergebnisse durchgeführt wurde, kann keine abschliessende Aussage darüber gemacht werden, wie statistisch relevant die Ergebnisse sind. Sowohl die Luftbildanalyse als auch die GIS-Modellierung sind nicht exakt. Als Beispiel hierfür dient das Kriterium "Strassen", welches PV-Flächen in der Nähe von Strassen als ungeeignet einstuft. Dies bedeutet, dass Flächen verloren gehen, welche in der Luftbildanalyse als geeignet betrachtet wurden. Ein weiterer Punkt ist, dass die Einteilung nach PV-Flächen auf den Schwellen und PV-Flächen auf den Schwellen, dem Schotterbett und den Banketten etwas umständlich ist. Für eine bessere Verständlichkeit wäre eine klarere Abgrenzung wünschenswert.

Abschliessend kann gesagt werden, dass Photovoltaik unter den erneuerbaren Energien zwar nicht die flächeneffizienteste Form der Energieproduktion ist, sie jedoch vor allem auf bereits belasteten Flächen zum Einsatz kommen kann. In der dichtbesiedelten Schweiz, wo jede freie Fläche wertvoll ist, ist dies ein starkes Argument für Photovoltaik.

8. Literaturverzeichnis

- Al-Hasan, A. Y. (1998). A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface. *Solar Energy*, 63(5), 323–333. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00060-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00060-7)
- Alpiq Holding AG. (2020). Cleuson-Dixence. Abgerufen 8. August 2020, von <https://www.alpiq.com/de/energieerzeugung/wasserkraftwerke/speicherkraftwerke/cleuson-dixence>
- Angmo, D., Espinosa, N., & Krebs, F. (2014). Indium tin oxide-free polymer solar cells: Toward commercial reality. In *Green Energy and Technology* (S. 189–225). https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6473-9_8
- Bankset Energy. (2019). Bankset Energy Systems 200Mw. In *Bankset Energy Solar Railway Product Catalogue International*. Zug.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2012). *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000 – 2050*.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2013a). *Energieperspektiven 2050: Sensitivitätsanalysen Photovoltaik - Ergebnisse der Modellrechnungen*.
- Bundesamt für Energie (BFE). (2013b). *Energieperspektiven 2050 - Zusammenfassung*. Abgerufen von http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_892303521.pdf
- Bundesamt für Energie (BFE). (2019). *Wasserkraftpotenzial der Schweiz. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung im Rahmen der Energiestrategie 2050*. Abgerufen von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGJlYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvOTgxNQ==.html>
- Bundesamt für Energie (BFE). (2020). Wasserkraft. Abgerufen 23. Juli 2020, von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html>
- Bundesamt für Statistik (BFS). (2019). Infrastruktur und Streckenlänge. Abgerufen 1. Juli 2020, von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/streckenlaenge.html>
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2001). *Vegetationskontrolle auf Bahnanlagen*. 33. Abgerufen von <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/uw-umwelt-wissen/vegetationskontrolleaufbahnanlagen.pdf.download.pdf/vegetationskontrolleaufbahnanlagen.pdf>
- Bundesamt für Verkehr (BAV). (2018). *Gleisaushubrichtlinie: Planung von Gleisaushubarbeiten, Beurteilung und Entsorgung von Gleisaushub*. (22.08.), 1–24. Abgerufen von https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/richtlinien/eisenbahn/richtlinie_entwaesserungvon-eisenbahnanlagen.pdf.download.pdf/richtlinie_entwaesserungvoneisenbahnanlagen.pdf
- Buri, P. (2020). AW: Bachelor thesis at ETH Zurich about solar cells on railways. *Email*, (info@bankset.com, 15.03.20).
- Chen, Z. S., Mo, S. P., & Hu, P. (2008). Recent progress in thermodynamics of radiation - Exergy of radiation, effective temperature of photon and entropy constant of photon. *Science in China, Series E: Technological Sciences*, 51(8), 1096–1109. <https://doi.org/10.1007/s11431-008-0158-x>
- Devine-Wright, P., & Batel, S. (2017). My neighbourhood, my country or my planet? The influence of multiple place attachments and climate change concern on social acceptance of energy infrastructure. *Global Environmental Change*, 47, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.08.003>
- EDA. (2017). Geografie. Abgerufen 4. August 2020, von <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/de/home/umwelt/geografie.html>
- Egli, T., Bolliger, J., & Kienast, F. (2017). Evaluating ecosystem service trade-offs with wind electricity production in Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 863–875.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.074>

- Eidg. Forschungsanstalt WSL. (2020). Produktionsregion. Abgerufen 26. Juli 2020, von <https://www.lfi.ch/resultate/regionen.php?lang=de>
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), ; (2017). Energiestrategie 2050: Abstimmung zum Energiegesetz. Abgerufen 17. Juli 2020, von <https://www.uvek.admin.ch/uvek/de/home/uvek/abstimmungen/abstimmung-zum-energiegesetz.html>
- EnergieSchweiz. (2020). *Winterstrom für die Schweiz. Warum wir auch in der Schweiz Windenergie brauchen.* Abgerufen von <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/8037>
- EnergySage. (2020). Solar Panel Efficiency: What Panels Are Most Efficient? Solar panel cell efficiency explained. Abgerufen 17. Juli 2020, von <https://news.energysage.com/what-are-the-most-efficient-solar-panels-on-the-market/>
- Esri. (2019). *ArcGIS Pro 2.4.0*. Copyright ©2019 Esri Inc. All Rights Reserved.
- eurogeographics. (2020). OpenData Downloads. Abgerufen von <https://eurogeographics.org/maps-for-europe/open-data/opendata-downloads/>
- EuroGeographics. (2019). *EuroGlobalMap release 2019. Pan-European Database at Small Scale. Specification and Data Catalogue*. 1–93.
- EuroGeographics. (2020). OpenData Downloads © EuroGeographics. Original product is freely available at eurogeographics.org. Terms of the licence available at <https://eurogeographics.org/products-and-services/open-data/topographic-data/>. OpenData Downloads. Abgerufen 5. März 2020, von <https://eurogeographics.org/maps-for-europe/open-data/opendata-downloads/>
- Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock, H. W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering R: Reports*, Bd. 40, S. 1–46. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00092-X)
- Goossens, D., & Van Kerschaever, E. (1999). Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: The effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy*, 66(4), 277–289. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00028-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00028-6)
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Ho-Baillie, A. W. Y. (2020). Solar cell efficiency tables (Version 55). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 28(1), 3–15. <https://doi.org/10.1002/pip.3228>
- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (Version 45). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 23(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/pip.2573>
- Gueymard, C. A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar Energy*, 76(4), 423–453. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.039>
- Isoti, M. (2020). Wtr: Re: Fwd: AW: Bachelor thesis at ETH Zurich about solar cells on railways. *Email*, (marc.isoti@bankset.com, 09.04.20).
- IWR. (2020). Windparks in Deutschland. Abgerufen 7. August 2020, von <https://www.offshore-windindustrie.de/windparks/deutschland>
- Iyengar, V. V., Nayak, B. K., & Gupta, M. C. (2010). Silicon PV devices based on a single step for doping, anti-reflection and surface passivation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(12), 2205–2211. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.07.013>
- Jones, C. R., & Eiser, J. R. (2009). Identifying predictors of attitudes towards local onshore wind development with reference to an English case study. *Energy Policy*, 37(11), 4604–4614. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.015>
- Jones, C. R., & Richard Eiser, J. (2010). Understanding «local» opposition to wind development in the UK: How big is a backyard? *Energy Policy*, 38(6), 3106–3117. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.051>

- Kaldellis, J. K., & Kapsali, M. (2011). Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. *Energy*, 36(8), 5154–5161. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.018>
- Kienast, F., Hersperger, A. M., Hergert, R., & Moran, L. S. (2014). Landschaftskonflikte durch erneuerbare Energien. *Forum für Wissen*, 69–77.
- Kienast, F., Huber, N., Hergert, R., Bolliger, J., Moran, L. S., & Hersperger, A. M. (2017). Conflicts between decentralized renewable electricity production and landscape services – A spatially-explicit quantitative assessment for Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 397–407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.045>
- Krohn, S., & Damborg, S. (1999). On public attitudes towards wind power. *Renewable Energy*, 16(1–4), 954–960. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(98\)00339-5](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(98)00339-5)
- Lai, C. S., Jia, Y., Lai, L. L., Xu, Z., McCulloch, M. D., & Wong, K. P. (2017). A comprehensive review on large-scale photovoltaic system with applications of electrical energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 439–451. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.078>
- Lu, Z. H., & Yao, Q. (2007). Energy analysis of silicon solar cell modules based on an optical model for arbitrary layers. *Solar Energy*, 81(5), 636–647. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.014>
- Maehr, A. M., Watts, G. R., Hanratty, J., & Talmi, D. (2015). Emotional response to images of wind turbines: A psychophysiological study of their visual impact on the landscape. *Landscape and Urban Planning*, 142, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.05.011>
- Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 14, S. 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Kamalisarvestani, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2920–2925. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.012>
- Meral, M. E., & Diner, F. (2011). A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2176–2184. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.010>
- Meteotest. (2012). *Energiestrategie 2050. Berechnung der Energiepotenziale für Wind- und Sonnenenergie*. Abgerufen von <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/uvp/externe-studien-berichte/energiestrategie2050berechnungderenergiepotenzialefuerwind-undso.pdf.download.pdf/energiestrategie2050berechnungderenergiepotenzialefuerwind-undso.pdf>
- Microsoft Corporation. (2018). *Microsoft Excel*. Abgerufen von <https://office.microsoft.com/excel>
- Nordmann, T., Frölich, A., & Clavadetscher, L. (2002). *Drei integrierte PV-Schallschutz Versuchsfelder. Bau und Erprobung*. Abgerufen von https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/066/34066592.pdf?r=1&r=1
- Nordmann, T., Vontobel, T., & Lingel, R. (2012). *Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen*. Feldmeilen.
- Park, K. E., Kang, G. H., Kim, H. I., Yu, G. J., & Kim, J. T. (2010). Analysis of thermal and electrical performance of semi-transparent photovoltaic (PV) module. *Energy*, 35(6), 2681–2687. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.019>
- Parlaktuna, M., Mertoglu, O., Simsek, S., Paksoy, H., & Basarir, N. (2013). Geothermal Country Update Report of Turkey (2010–2013). In *European Geothermal Congress*. Abgerufen von https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGStandard/EGC/2013/EGC2013_CUR-32.pdf
- Photovoltaik.org. (2020a). Photovoltaik Preise 2019. Abgerufen 30. Juli 2020, von <https://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/photovoltaik-preise>
- Photovoltaik.org. (2020b). Photovoltaik Wirkungsgrad. Abgerufen 5. Juli 2020, von

<https://www.photovoltaike.org/wissen/photovoltaik-wirkungsgrad>

- Picchi, P., van Lierop, M., Geneletti, D., & Stremke, S. (2019). Advancing the relationship between renewable energy and ecosystem services for landscape planning and design: A literature review. *Ecosystem Services*, 35, 241–259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.12.010>
- Polman, A., Knight, M., Garnett, E. C., Ehrler, B., & Sinke, W. C. (2016). Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science*, 352(6283). <https://doi.org/10.1126/science.aad4424>
- pv magazine. (2018). Bankset Energy veröffentlicht Gigawattpläne für Photovoltaik auf Bahnschienen weltweit. Abgerufen 14. Februar 2020, von <https://www.pv-magazine.de/2018/10/10/bankset-energy-veroeffentlicht-gigawattplaene-fuer-photovoltaik-auf-bahnschienen-weltweit/>
- Rhätische Bahn. (2020). Nachhaltigkeit. Kennzahlen. Abgerufen 26. Juli 2020, von <https://www.rhb.ch/de/unternehmen/kennzahlen/nachhaltigkeit>
- Rhienergie AG. (2017). *rhienergie feiert Sanierung der Pionier-Photovoltaik-Anlage an A 13*. Abgerufen von <http://rhienergie.ch/media/uploads/news/9/documents/medienmitteilung-rhienergie-ag-pva-a13.pdf>
- Sæþórsdóttir, A. D., & Ólafsdóttir, R. (2020). Not in my back yard or not on my playground: Residents and tourists' attitudes towards wind turbines in Icelandic landscapes. *Energy for Sustainable Development*, 54, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.11.004>
- Salak, B., Kienast, F., Olschewski, R., Spielhofer, R., Wissen, U., Grêt-Regamey, A., & Hunziker, M. (2019). steuerBAR? Wo wollen wir «Energiewirtschaften» und wo nicht? In *Forum für Wissen*. Abgerufen von https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl%3A21922/datastream/PDF/download/Salak-2019-steuerBAR-_Wo_wollen_wir_%27Energiewirtschaften%27-%28published_version%29.pdf
- Sarkin, A. S., Ekren, N., & Sağlam, Ş. (2020). A review of anti-reflection and self-cleaning coatings on photovoltaic panels. *Solar Energy*, 199, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.084>
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013, Juni 1). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Bd. 22, S. 698–733. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.065>
- SBB. (2020). Verbrauch. Abgerufen 26. Juli 2020, von <https://company.sbb.ch/de/sbb-als-geschaeftpartner/leistungen-evu/energie/verbrauch.html>
- Schiedskommission im Eisenbahnverkehr SKE / RailCom. (2020). *Faktenblatt Schienennetz*. (März), 1–3. Abgerufen von https://www.railcom.admin.ch/inhalte/pdf/Themen/Themen_DE/RailCom_Faktenblatt_Schienennetz_D_2020.pdf
- Scottish Natural Heritage. (2014). *Siting and Designing Wind Farms in the Landscape*. Abgerufen von [https://www.nature.scot/sites/default/files/Publication 2014 - Siting and designing wind farms in the landscape - Version 2.pdf](https://www.nature.scot/sites/default/files/Publication%202014%20-%20Siting%20and%20designing%20wind%20farms%20in%20the%20landscape%20-%20Version%202.pdf)
- Smith, D. D., Cousins, P. J., Masad, A., Waldhauer, A., Westerberg, S., Johnson, M., ... Vicente, D. (2012). Generation III high efficiency lower cost technology: Transition to full scale manufacturing. *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1594–1597. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317899>
- Solar Campus GmbH. (2020). Solarrechner. Abgerufen 6. August 2020, von https://www.energieschweiz.ch/page/de-ch/solarrechner/?SYSTEM=1&TECHNOLOGIE=1&POSTLEITZAHL=6005&X=210565&Y=666907&NEIGUNG=10&AUSRICHTUNG=-45&BEDARF_WARMWASSER=119995&FLAECHE=1605
- solarbaba. (2018). Bankset Energy Announces GW-Scale Plans For Solar Railways The World Over. Abgerufen 10. Februar 2020, von <https://www.solarbaba.com/bankset-energy-announces-gw-scale-plans-for-solar-railways-the-world-over/>
- Suisse Éole. (2020). *WINDENERGIESTRATEGIE : WINTERSTROM & KLIMASCHUTZ Analyse und Aktualisierung des Potenzials der Windenergie in der Schweiz*. Abgerufen von

<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/windenergie.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGJjYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAxMDk=.html>

- swissnuclear. (2019). Nukleare Stromproduktion 2018: Schweizer Kernkraftwerke mit kräftiger Produktionssteigerung. Abgerufen 7. August 2020, von https://www.swissnuclear.ch/de/nukleare-stromproduktion-2018-schweizer-kernkraftwerke-mit-kraeftiger-produktion-_content---1--43--402.html
- swisstopo. (2019a). *SWISSIMAGE © 2019 swisstopo (DV033594)*.
- swisstopo. (2019b). *swissTLM3D © 2019 swisstopo (DV033594)*.
- TNC Consulting AG. (2020). PV Schallschutz Anlagen. Abgerufen 18. Juli 2020, von <https://www.tnc.ch/photovoltaik/>
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3), 289–296. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(03)00241-6)
- Upreti, B. R., & Van Der Horst, D. (2004). National renewable energy policy and local opposition in the UK: The failed development of a biomass electricity plant. *Biomass and Bioenergy*, 26(1), 61–69. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00099-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00099-0)
- Vallati, A., De Lieto Vollaro, R., Tallini, A., & Cedola, L. (2015). Photovoltaics noise barrier: Acoustic and energetic study. *Energy Procedia*, 82, 716–723. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.797>
- Van Grieken, M., & Dower, B. (2017). Wind Turbines and Landscape. In *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines* (S. 493–515). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809451-8.00023-0>
- Wang, Z., Zhu, H., Cao, N., Du, R., Liu, Y., & Zhao, G. (2017). Superhydrophobic surfaces with excellent abrasion resistance based on benzoxazine/mesoporous SiO₂. *Materials Letters*, 186, 274–278. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.10.010>
- Wegatech. (2020). Photovoltaik Wirkungsgrad - das leisten moderne Photovoltaikanlagen. Abgerufen 30. Juli 2020, von <https://www.wegatech.de/ch/ratgeber/photovoltaik/grundlagen/wirkungsgrad/>
- Wikipedia. (2020). Bahnschwelle. Abgerufen 31. Juli 2020, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnschwelle#Kunststoffschwelle>
- Wolsink, M. (2007). Planning of renewables schemes: Deliberative and fair decision-making on landscape issues instead of reproachful accusations of non-cooperation. *Energy Policy*, 35(5), 2692–2704. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.002>
- Wolsink, M., & Breukers, S. (2010). Contrasting the core beliefs regarding the effective implementation of wind power. An international study of stakeholder perspectives. *Journal of Environmental Planning and Management*, 53(5), 535–558. <https://doi.org/10.1080/09640561003633581>
- Yamada, T., Nakamura, H., Sugiura, T., Sakuta, K., & Kurokawa, K. (2001). Reflection loss analysis by optical modeling of PV module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 67(1–4), 405–413. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00309-3](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(00)00309-3)

9. Anhang

9.1 Schätzungen aus der Luftbildanalyse

Tabelle 16: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Zürich - Luzern (IR 75)

Strecke: Zürich - Luzern (IR 75)					
Abschnitt:	Bemerkung	PV-Anteil [%]	Abschnitt:	Bemerkung	PV-Anteil [%]
1		90	30		20
2	Brücke	5	31		50
3	Tunnel	0	32		50
4	Tunnel	0	33		40
5	Tunnel	0	34		40
6	Tunnel	0	35	Bahnhof	25
7	Tunnel	0	36	Brücke	40
8	Tunnel	0	37		40
9	Tunnel	0	38	Brücke	15
10	Tunnel	0	39		45
11	Tunnel	0	40		30
12	Bahnhof	20	41		30
13		40	42	Wand	20
14	Brücke	30	43	Bahnhof	20
15	kl. Brücke	30	44		40
16		20	45		40
17	Weiche	10	46		60
18	Tunnel	0	47	Brücke	30
19	Tunnel	0	48		40
20		60	49		55
21	Tunnel	0	50		25
22	Tunnel	0	51		15
23	Tunnel	0	52		20
24	Brücke	25	53	Bahnbrücke	15
25		40	54		35
26		35	55		50
27		50	56	Tunnel	25
28	Bahnhof	5	57		50
29	Bahnhof	0			

Tabelle 17: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Luzern – Schüpfheim – Bern

Strecke: Luzern - Bern via Schüpfheim									
Ab-schnitt:	Bemer-kung	PV-Anteil [%]	Gleise [m]	% nur Schwellen	Ab-schnitt:	Bemer-kung	PV-Anteil [%]	Gleise [m]	% nur Schwellen
1	Brücke	20	114	0.04	51		20	100	0.03
2	Tunnel	0	0	0.00	52		10	75	0.03
3		45	300	0.10	53		15	90	0.03
4	Tunnel	0	0	0.00	54		20	100	0.03
5		20	100	0.03	55		20	100	0.03
6	Bahnhof	50	140	0.05	56		20	100	0.03
7		20	100	0.03	57	Bahnhof	80	450	0.15
8		20	100	0.03	58		20	100	0.03
9		20	100	0.03	59		15	100	0.03
10		20	100	0.03	60		20	100	0.03
11		20	100	0.03	61		50	280	0.09
12	Bahnhof	10	50	0.02	62		20	100	0.03
13		20	100	0.03	63		30	150	0.05
14		20	100	0.03	64		30	200	0.07
15	Bahnhof	60	350	0.12	65		25	170	0.06
16		20	100	0.03	66		30	200	0.07
17		20	100	0.03	67		20	100	0.03
18		25	100	0.03	68	Brücke	10	75	0.03
19		25	100	0.03	69		10	80	0.03
20		20	100	0.03	70		15	100	0.03
21		25	180	0.06	71		30	200	0.07
22		20	100	0.03	72		30	200	0.07
23		20	100	0.03	73		30	200	0.07
24		20	100	0.03	74	Bahnhof	65	350	0.12
25		20	100	0.03	75		20	100	0.03
26		20	100	0.03	76		20	100	0.03
27		20	100	0.03	77		20	100	0.03
28		20	100	0.03	78		30	200	0.07
29		20	85	0.03	79		35	200	0.07
30		20	100	0.03	80		20	100	0.03
31		20	100	0.03	81		20	100	0.03
32		20	100	0.03	82	Schatten-wurf	10	100	0.03
33		20	100	0.03	83		20	100	0.03
34		20	100	0.03	84		20	100	0.03
35	Bahnhof	10	200	0.07	85		20	100	0.03
36		20	80	0.03	86		45	260	0.09
37		20	100	0.03	87	Bahnhof	70	300	0.10
38		20	100	0.03	88		45	300	0.10
39		20	100	0.03	89		60	300	0.10
40		20	100	0.03	90		60	450	0.15
41		20	90	0.03	91		55	400	0.13
42		15	85	0.03	92		25	200	0.07
43		15	90	0.03	93		70	340	0.11
44		20	100	0.03	94		60	400	0.13
45		20	100	0.03	95		40	150	0.05
46		20	100	0.03					
47		20	100	0.03					
48		20	100	0.03					
49		20	100	0.03					
50		20	100	0.03					

Tabelle 18: Schätzung des PV-Anteils der Strecke Davos Dorf – Le Prese

Strecke: Davos Dorf - Le Prese					
Abschnitt:	Bemerkung	PV-Anteil [%]	Abschnitt:	Bemerkung	PV-Anteil [%]
1		15	52	Waldrand	10
2		15	53		15
3	Bahnhof	10	54		15
4		20	55		20
5		20	56		15
6		15	57		20
7		20	58		20
8		25	59		15
9		20	60		15
10		20	61	Bahnhof	50
11	Tunnel	0	62		15
12	Tunnel	0	63		15
13		25	64		20
14	Tunnel	10	65		20
15	Wald	0	66		20
16	Tunnel	0	67		20
17	Tunnel	0	68		15
18		20	69		15
19		20	70		15
20	Tunnel	0	71		20
21		20	72		20
22		35	73		20
23		15	74		15
24	Tunnel	5	75		20
25	Wald	10	76		20
26		20	77		20
27	Wald	5	78		20
28		25	79		20
29		25	80	Galerie	0
30	Tunnel	5	81	Tunnel	0
31	Bahnhof	25	82	Galerie	0
32		20	83	Galerie	0
33	Tunnel	10	84	Tunnel	0
34	Wald	10	85		20
35		20	86		25
36		20	87	Galerie	5
37		40	88		15
38	Tunnel	0	89	Tunnel	10
39		20	90		20
40	Tunnel	0	91	Tunnel	10
41		20	92		20
42		20	93		20
43		30	94	Tunnel	0
44	Tunnel	0	95		15
45	Tunnel	0	96		20
46	Tunnel	0	97		20
47	Tunnel	0	98		20
48	Tunnel	0	99		20
49	Tunnel	0	100	Strassenübergang	15
50		15	101		20
51		15	102		10

9.2 Solarrechner und Berechnung der Energieproduktion

Solarrechner

Mit dem Solarrechner können Sie die ungefähre Energieproduktion, die Gesamtkosten und die Amortisationsdauer einer auf Ihre Bedürfnisse zugeschnittenen Solaranlage berechnen.

Abbildung 6: Eingaben in den Solarrechner zur Berechnung der Energieproduktion pro m² (Solar Campus GmbH, 2020)

Als Orte, an denen die Energieproduktion mit dem Solarrechner berechnet wurde, wurden die Start- und Endpunkte der ausgewählten Strecken sowie Schüpfheim als Knotenpunkt der Strecke Luzern – Bern verwendet.

Tabelle 19: Resultate des Solarrechners und Berechnung mittleren Energieproduktion m²

Berechnung kWh/m ²							
PLZ	Ort	Fläche m ²	kWh/a	kWh/m ²	Wirkungsgrad	Anlage	
8001	Zürich	476	85024	179	21	100kW	
6003	Luzern	476	81351	171	21	100kW	
6170	Schüpfheim	476	83571	176	21	100kW	
3004	Bern	476	90323	190	21	100kW	
7260	Davos Dorf	476	110596	232	21	100kW	
7746	Le Prese	476	91992	193	21	100kW	
Mittelwert der Energieproduktion [kWh/m²]				190			

9.3 Eigenständigkeitserklärung



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Welches Potenzial hat das Schienennetz für Photovoltaikanlagen?

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Alt

Vorname(n):

Johannes

_____	_____
_____	_____
_____	_____
_____	_____

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „[Zitier-Knigge](#)“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Weggis, 08.08.2020

Unterschrift(en)

_____	_____
_____	_____
_____	_____

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.