

# Photovoltaik für Elektromobilität – eine GIS-gestützte Analyse zur Identifizierung und Bewertung des Photovoltaikpotenzials auf städtischen Freiflächen zur Versorgung von Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge

*Ernst Gebetsroither-Geringer, Romana Stollnberger, Mario Köstl*

(Dr. Ernst Gebetsroither-Geringer, AIT Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, ernst.gebetsroither@ait.ac.at)  
(DI Romana Stollnberger, AIT Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, romana.stollnberger@ait.ac.at)  
(Mag. Mario Köstl, AIT Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 2, 1210 Vienna, mario.koestl@ait.ac.at)

## 1 ABSTRACT

Urbane Freiflächen wie Straßenräume, Großparkplätze oder Erholungsflächen bieten ein bislang wenig genutztes Potenzial für die Implementierung von Photovoltaikanlagen. Das Projekt Syn[En]ergy<sup>1</sup> (Zeitraum Februar 2016 bis Jänner 2018), durchgeführt vom Austrian Institute of Technology GmbH, der Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) und Nikko Photovoltaik GmbH, verfolgt die Erforschung von Synergien zwischen einer Photovoltaiknutzung auf horizontalen Stadtflächen und anderen Nutzungsansprüchen als Grundlage für eine nachhaltige Energieerzeugung. Dazu wurden Energieproduktionspotenziale unter Berücksichtigung lokaler Standortspezifika für die Untersuchungsgebiete Wien und Korneuburg abgeschätzt und darauf aufbauend ökonomisch effiziente und sozial akzeptierte Anwendungsszenarien für einzelne Standorte entwickelt.

In dieser Arbeit werden, als kleiner Teil von Syn[En]ergy, verschiedene Anwendungsszenarien für zukünftige Implementierungen von PV in Städten zur Unterstützung der E-Mobilität (E-Bikes) dargestellt und wesentliche Barrieren und Herausforderungen aufgezeigt, um dieses PV-Potenzial in urbanen Räumen nutzen zu können. Es wurde eine PV-Potenzial-Analyse für existierende Citybike-Stationen in Wien durchgeführt, die eine allgemeine ökonomische Analyse beinhaltet und für ausgewählte Stationen Szenarios vergleicht. Zusätzlich wird kurz erläutert, wie Standorte für zukünftige Stationen unter der Berücksichtigung des vorhandenen PV-Potenzials gefunden werden könnten.

Keywords: E-Mobilität, GIS-Analyse, Photovoltaik, Stadtgestaltung, Solarpotenzial

## 2 EINLEITUNG

Die Verringerung von Klima- und Umweltbelastungen durch den Verkehr sowie die Senkung der Abhängigkeit von fossilen Treibstoffen zählen zu den zentralen Herausforderungen der nächsten Jahre. Elektromobilität mit erneuerbarer Energie ist dabei ein wesentlicher Baustein zur Erfüllung nationaler und EU Vorgaben zur Luftqualität, Emissionsbegrenzung und Umsetzung des Weltklimavertrages von Paris. Österreich setzt sich zum Ziel, bis 2050 einen weitestgehend klimaneutralen Verkehrssektor zu schaffen, u.a. durch den Ausbau des öffentlichen Verkehrs, der Förderung der aktiven Mobilitätsformen und dem Umstieg auf Nullemissions-Fahrzeuge auf Basis von erneuerbarer Energien. Langfristig ist eine solche Elektrifizierung des Straßenverkehrs nur mit einer Stromversorgung durch erneuerbare Energiesinnvoll (BMVIT, 2017). PV-basierende Lösungen für öffentliche Verkehrsmittel können eine wichtige Rolle für den Übergang von fossilen Energieträgern zu erneuerbaren Energiequellen spielen.

Die Berücksichtigung der ökonomischen Komponente bei der Entwicklung innovativer Lösungen spielt hierbei eine große Rolle. Höhere Eigenstromverbrauchsrate erhöhen die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen maßgeblich, da die PV-Stromerzeugungskosten niedriger sind als die Endverbraucherpreise. Eine vielversprechende Option zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs ist die Kombination von PV und E-Mobilität. Ladestationen mit PV-Strom können dazu beitragen, die Nachhaltigkeit des künftigen Verkehrssystems zu fördern.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine erste grobe Bilanz-Analyse der aus dem lokalen Stromertrag von PV-Anlagen und der benötigten lokalen Strom-Nachfragemenge zu erstellen, wobei hier exemplarisch ein Einsatz bestehender E-Bike-Ladestationen präsentiert wird. Zunächst wurde in einer räumlichen Analyse ermittelt, wo in Wien PV-Potenziale vorhanden sind, anschließend wurde das Potenzial für neue Ladestationen untersucht, bei denen PV einen erheblichen Teil der Stromversorgung liefern könnte. Die spezifischen Stromverteilungs- und Bedarfslastprofile wurden auch in der räumlichen Analyse

<sup>1</sup> <http://synenergy.boku.ac.at/>, letzter Zugriff am 12.06.2017

berücksichtigt, um dadurch geeignete Standorte zu finden. Eine vereinfachte ökonomische Analyse der PV-Anlagen aufgrund verschiedener Faktoren wie Größe, Ausrichtung, spezifische Installationskosten, Instandhaltungskosten, Eigenstromverbrauchsrate oder die Möglichkeit von Subventionen durchgeführt soll die wichtigsten Einflussfaktoren für einen hohen ökonomischen Ertrag aufzeigen.

### 3 PV-ANWENDUNGEN IM STADTRAUM UND IHRE SYNERGIEEFFEKTE

Die Nutzung urbaner Freiräume für Stromerzeugung beinhaltet zahlreiche Vorteile und Chancen, aber auch Nachteile bzw. Herausforderungen, die im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

Vorteile bzw. Chancen, die sich durch die Installation von PV-Anlagen im Stadtraum ergeben, sind u.a.:

- Die Themen Sichtbarkeit & Bewusstsein: Werden die Anlagen im Gegensatz zu oft nicht einsehbaren Aufdach-Anlagen präsent im Stadtraum installiert, können diese von der Bevölkerung aktiv wahrgenommen werden, wodurch das Image von erneuerbaren Energieinfrastrukturen als innovative Lösungen gefördert werden kann.
- Photovoltaik kann zur Standortaufwertung beitragen und einem Gebiet durch die Sichtbarmachung technischer Innovationen eine neue Identität verschaffen (z.B. durch die Installation von PV-Kunstwerken oder auch mobilen PV-Lösungen)
- Durch die Installation diverser Multimedia-Stationen bzw. Solartankstellen (z.B. an Haltestellen des öffentlichen Personennahverkehrs, um Smartphones aufzuladen (Schrenk et al. 2010)) kann auch die Nutzbarkeit des Freiraums beeinflusst werden.

Nachteile bzw. Herausforderungen durch die Installation von PV-Anlagen im Stadtraum sind:

- Das Stadtbild kann durch die Errichtung wesentlich beeinflusst werden. Die Gestaltung muss mit der entsprechenden zuständigen Stelle<sup>2</sup> abgesprachen und diskutiert werden.
- Bei der Positionierung an speziell ausgewählten Orten (z.B. Citybike-Stationen oder Bushaltestellen oder auf Verkehrsflächen) im Stadtraum müssen die lokalen Gegebenheiten mitberücksichtigt werden. Sind beispielsweise nur geringe Variationsmöglichkeiten bezüglich Größe, Lage oder Ausrichtung gegeben, können verminderte Energieerträge im Vergleich zu herkömmlichen Aufdach- oder Freiflächen die Folge sein.
- Sicherheitstechnische Vorkehrungen müssen beachtet werden. Der Öffentlichkeit zugängliche Solaranlagen als Überdachung z.B. in Parks oder öffentlichen Grünanlagen dürfen in Österreich nicht direkt aus Standard-Solarmodulen bestehen, wenn diese ‚nur‘ Glas-Folien-Laminat benutzen und nicht als so genannte ‚Überkopfverglasung‘ zugelassen sind. Als Überdachung können z.B. Solarmodule aus Verbund Sicherheitsglas (VSG), aus Kunststoff (Gefahr herabfallender Glasscheiben ist hier nicht gegeben) oder Standardmodule mit einer Unterkonstruktion aus unterschiedlichen Materialien (Draht, Blech, Holz, Metall) verwendet werden.
- Die Installation an belebten (frei zugänglichen) Orten erhöht die Gefahr von Vandalismus.
- Die Wartung und Überwachung der Anlagen erfordert zusätzliche, langfristige Investitionen.
- PV-Sondermodule, die v.a. durch ihre Sichtbarkeit zur Akzeptanz beitragen könnten, sind teilweise technisch noch nicht ausgereift und werden kommerziell noch nicht angeboten (z.B. PV auf Bodenbelägen).

#### 3.1 Solarpotenzial für unterschiedliche Anwendungstypen

Innerhalb des Syn[En]ergy Projektes wurden verschiedene Nutzungskonzepte für die Photovoltaik in urbanen Freiräumen entwickelt. Diese Konzepte stellen eine Kombination aus 15 Freiraumtypen und mehreren Photovoltaikanwendungen dar, wobei diese in 6 Klassen eingeteilt wurden: Solarkraftwerke, Lineare Photovoltaik (entlang von Infrastrukturen – meist Brücken), Beläge, Überdachungen,

<sup>2</sup> In Wien MA19 Architektur und Stadtgestaltung

Freiraumausstattung und mobile Photovoltaik. Ausführliche Details dazu sind auf der Projekthomepage zu finden.<sup>3</sup>

Einer der 15 untersuchten Freiraumtypen charakterisiert Stellplätze, die mit verschiedenen PV-Anwendungen bestückt werden können, hierzu zählen u.a. überdachte Parkplätze. Die in diesem Beitrag näher betrachteten Citybike-Stationen finden sich in den Freiraumtypen Urbane Plätze oder Straßenräume. Für die verschiedenen Nutzungskonzepte wurden – sofern GIS-Daten zur Abgrenzung zur Verfügung standen – Potenziale ausgewiesen, die online zur Verfügung gestellt werden. Dafür wurde im Rahmen des Projektes eine Web-Applikation entwickelt, die diese Potenziale in der Form von Karten (mittels WMS<sup>4</sup>) darstellt.

#### 4 RÄUMLICHE ANALYSE DES SOLARPOTENZIALS

Die räumliche PV-Potenzialbewertung wurde mittels ArcMap©durchgeführt, um eine effiziente Analyse des gesamten Untersuchungsgebiets (Stadt Wien und Gemeinde Korneuburg) zu ermöglichen. Mit Hilfe des ArcGIS-Tools Area Solar Radiation (Esri, 2017) wurde die Sonneneinstrahlung flächendeckend berechnet (Paccagnel, K., o.J.; Oßwald, M., 2013; Chow, A. et al. 2014).

Die Sonneneinstrahlung an einem bestimmten Ort ist abhängig von dessen Höhe, seiner Neigung und Ausrichtung sowie dem durch topografische Gegebenheiten (Bäume, Sträucher, Erhebungen,..) verursachten Schatten (vgl. Abbildung 1). Das Tool Area Solar Radiation berücksichtigt bei der Berechnung neben Breiten- und Höhengraden von Standorten ebenso die Neigung, Ausrichtung, tägliche Veränderungen des Sonnenstandes sowie Schattenwürfe aufgrund der umliegenden Topografie.

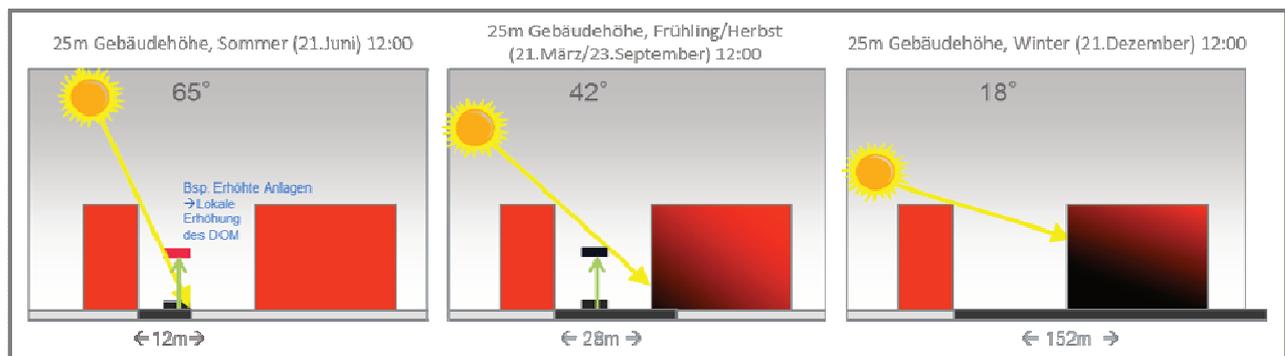


Abb. 1: schematische Darstellung eines Schattenwurfs in Abhängigkeit von Sonnenstand und Gebäudegröße bzw. -höhe (eigene Darstellung AIT)

Die einfallende Sonneneinstrahlung wurde dabei unter Einsatz des digitalen Oberflächenmodell (DOM) der Stadt Wien (Stadt Wien, 2017) - abgeleitet. Für eine Analyse für Gesamt Wien ergibt sich bei einer Auflösung von 1m<sup>2</sup> eine Rechenzeit von mehr als einem Monat. Durch eine Aufteilung der Daten in mehrere überlappende Teile, konnte mittels ArcPy-Script und multi-processing mehrere Teile parallel berechnet werden, wodurch sich die Rechendauer auf 6-7 Tage reduzierte und im Falle eines Systemabsturzes nur kleinere Mengen an Zeit und Daten verloren gehen. Im Folgenden werden einige wesentliche Punkte beschrieben, die bei der Datenaufbereitung zu berücksichtigen sind.

Die Höhe und Ausdehnung von Objekten beeinflussen den Schattenwurf maßgeblich. Die Verwendung eines DOM gestattet die Wiedergabe der Höhenstruktur der Stadt inklusive aller Gebäude und Vegetation und ist für eine flächendeckende Schattenanalyse und eine daraus abgeleitete PV-Potenzialabschätzung notwendig. Da die letzte Airborne Laserscan (ALS) – Befliegung der Stadt Wien im Jahr 2007 erfolgte, erschie eine Aktualisierung der Daten notwendig. Diese wurde hauptsächlich anhand des aktuellen Baukörpermodells (BKM) von Wien durchgeführt. In der Abbildung 2 ist die Überarbeitung des DOM exemplarisch anhand des Areals rund um den Wiener Hauptbahnhof dargestellt. Der dargestellte Schattenwurf entspricht jenem am 21. September um 11:00h.

<sup>3</sup> <http://synenergy.boku.ac.at/index.php/projektphasen/ap3-entwicklung-von-nutzungskonzepten-fuer-photovoltaik-in-urbanen-freiraumen/>

<sup>4</sup> Web Map Service

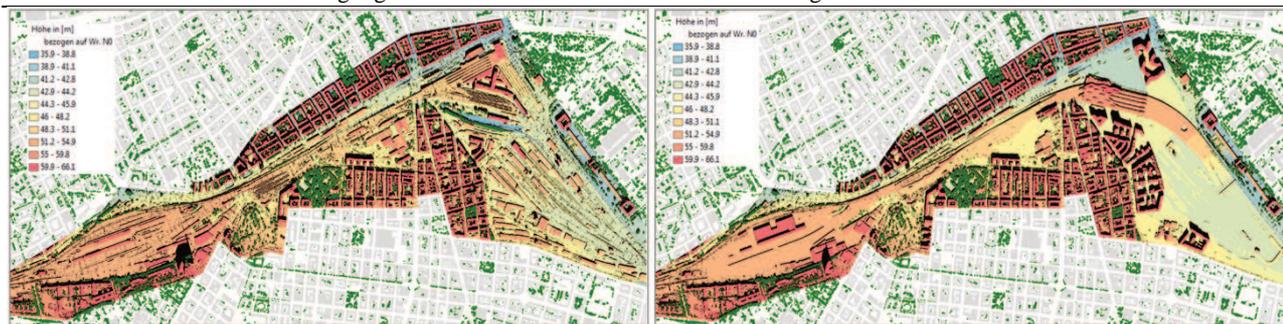


Abb. 2: DOM 2007 (links) und aktualisiertes DOM (rechts) (eigene Darstellung AIT)

Im Rahmen der Aktualisierung wurden zusätzlich „Störobjekte“ im DOM, die die Schattenwurfberechnung beeinflussen (z.B. Abgasfahnen, Flugobjekte, Kräne oder Hochspannungsleitungen), bereinigt. Bei der Schattenberechnung würden diese Störobjekte als bis zum Boden reichende Barrieren mit Höhen bis zu 200m über dem Terrain modelliert werden. Die folgende Abbildung<sup>3</sup> zeigt als Beispieleiner solchen Störung die Abgasfahne der Müllverbrennungsanlage Flötzersteig: Links ist das originale DOM dargestellt, in der Mitte der sich daraus ergebende Schattenwurf am 21.9 um 15:00h und rechts der Schattenwurf zum selben Zeitpunkt, nun aus dem aktualisierten (bzw. korrigierten) DOM.

Insgesamt wurden neben der Berücksichtigung des aktuellen BKM in ca. 300 unterschiedlich großen Gebieten semi-automatisch Areale korrigiert, sofern Störungen identifiziert werden konnten. Dies betraf v.a. Kräne sowie das gesamte Hochspannungsnetz, aber z.B. neben der oben dargestellten Bahnführung im Bereich des (neuen) Hauptbahnhofs auch die neue U2-Trasse nach Aspern, da Verkehrsinfrastruktur-Bauten nicht Teil des BKM sind. Zudem wurden auch zahlreiche, noch nicht im BKM enthaltene Gebäude manuell editiert und ebenfalls ins aktualisierte (korrigierte) DOM inkludiert, sofern deren Schattenwurf als bedeutend angesehen wurde. Auch signifikante Änderungen der Baumvegetation wurden im Rahmen der Aktualisierung berücksichtigt.



Abb. 3: Originales DOM, Schattenwurf im originalen DOM, Schattenwurf im korrigierten DOM (eigene Darstellung AIT)

## 5 ANWENDUNGSSZENARIO CITYBIKE WIEN

In diesem Abschnitt soll nun der Teil des Forschungsprojektes Syn[En]ergy vorgestellt werden, der das Solarpotenzial bei Citybike-Stationen der Stadt Wien behandelt. Zusätzlich werden die Herausforderungen, die sich einerseits bei der Analyse, andererseits bei der Implementierung selbst unter Berücksichtigung planerischer, räumlicher und ökonomischer Aspekte ergeben, dargestellt. Die durchgeführte Analyse ist nur als Grobanalyse zu verstehen, um Schlüsselemente und Herausforderungen bei einer Implementierung von PV-Strom versorgten City-E-Bikes zu identifizieren.

### 5.1 (E)-Bike-Sharing-Systeme

Bike-Sharing Systeme zielen darauf ab, den Radverkehrsanteil Verkehrsaufkommen zu erhöhen, was nebenbei auch dazu führt, die aktive Mobilität der Bevölkerung im Alltag zu steigern. Neben der Verringerung von Treibhausgasemissionen durch die Wahl eines umweltfreundlichen Verkehrsmittels, wird dadurch zusätzlich die allgemeine Gesundheit gefördert. Weitere positive Effekte bei der Nutzung von Citybikes v.a. bei elektrischen Citybikes sind:

- Radfahren stellt auch für weniger mobile Personengruppen - wie z.B. ältere Personen - eine gute Alternative zum Motorisierten Individualverkehr dar.
- Die Verwendung von E-Bikes ermöglicht einfaches Fahren auch bei hügeliger Topografie, da durch die Zuschaltung von Energie die eigene Anstrengung reduziert wird, womit auch längere Fahrten im hügeligen Stadtgebiet erleichtert werden.
- Ein weiterer Ansporn für eine Stadt, ein (E)-Bike-Sharing System zu etablieren, stellt die Verbesserung des Images der Stadt dar.
- Neben der Positionierung als Smart City wird das Angebot an öffentlichen Verkehrsmitteln für die Stadtbewohner bzw. auch Touristen erhöht und die Lebensqualität dadurch gesteigert. (Leitgöb, 2016 und Fogelberg, 2014)

Weitere Fragestellungen, die sich in Hinblick auf die Implementierung von E-Citybikes stellen betreffen z.B. die Reichweite der Fahrräder, das Management des Aufladens der Akkus, um ausreichend geladene E-Bikes für die täglichen Entlehnungsdauer zu gewährleisten oder das Akkusystem selbst (austauschbarer Akku versus Akku, der direkt an der Station geladen wird).

## 5.2 Analysen & Ergebnisse

Die vorliegenden Analysen behandeln zum einen die Frage, welche der derzeit in Wien existierenden Citybike-Stationen prinzipiell ein hohes PV-Potenzial aufweisen und wie weit dadurch der Bedarf etwaiger E-Bikes gedeckt werden könnte. Zum anderen wurden auch Standorte für zukünftige PV-bestückte Citybike-Stationen abgeleitet, wobei es in beiden Fällen nicht darum ging, exakte Berechnungen anzustellen, da dies z.B. aufgrund der Datenlage nicht möglich ist. So mussten für die Berechnung oft Annahmen getroffen werden, die die Ergebnisse natürlich beeinflussen. Vielmehr stand im Vordergrund, einen Überblick über die Rahmenbedingungen und Schwerpunkte, die bei dem Thema beachtet werden müssen, zu geben. Zudem wurde die Sensitivität einzelner Annahmen überprüft und z.T. im Folgenden beschrieben.

### 5.2.1 Potenzialberechnung und -analyse (Bedarfsdeckung) an vorhandenen Citybike-Stationen

Als Datengrundlage wurden vom Betreiber der Citybikes Wien, der Gewista Werbegesellschaft mbH (Gewista, 2017) ca. eine Million Entlehnungsvorgänge für die drei Monate März, Juni und August der Jahre 2014-2016 zur Verfügung gestellt. Für jeden Datensatz sind der Zeitpunkt der Entlehnung (Datum, Uhrzeit), die Entlehnungsstation (Nummer, Name), der Zeitpunkt der Rückgabe (Datum, Uhrzeit), die Rückgabestation (Nummer, Name) sowie die Radnummer erfasst. Angaben zum Nutzer sind aus Datenschutzgründen selbstverständlich in den Daten nicht enthalten.

Die räumlichen Informationen der Citybike-Stationen stehen im Rahmen der Open Government Data (OGD) Initiative der Stadt Wien kostenfrei als Punkt-Daten zur Verfügung. Als erster Schritt wurden aus allen 121 Stationen in Wien jene ausgewählt, bei denen die mittlere jährliche Solarstrahlung über 700 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr im Umkreis von zwei Meter rund um den Stationspunkt beträgt. Die Auswahl dieser Stationen erfolgte aufgrund allgemeiner ökonomischer Betrachtungen (s.u.), da Standorte mit geringerer Solareinstrahlung aus verschiedenen Gründen nicht wirtschaftlich sind und es andere Standorte gäbe, die besser zur PV-Stromerzeugung geeignet wären.

Im nächsten Schritt wurde in einer detaillierten Berechnung das Solarpotenzial für die ausgewählten 33 Stationen (inkl. eines 100-m-Umkreises rund um die Station<sup>5</sup>) für den 21. März, 21. Juni und 21. August im Stundenintervall durchgeführt. Im Zuge des Projektes wurden aufbauend auf der Vorselektion der Stationen detaillierte Analysen für eine exemplarische Station mit hohem (Station Hauptbahnhof) und eine mit niedrigem Solarpotenzial (Station Sankt-Elisabeth-Platz) durchgeführt (vgl. Abb. 4). Der Grund für die detaillierte Untersuchung der PV-Potenziale mit stündlicher Auflösung liegt darin, dass ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit der Anteil der Eigenstromnutzung ist. In einer jährlichen Bilanz können derartige Abschätzungen aber nicht gemacht werden, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Strom, der nicht am jeweiligen Tag im Citybike-System verbraucht wird, längere Zeit bei den Stationen

<sup>5</sup> Dieser Umkreis von 100m ist deshalb notwendig um alle Objekte zu berücksichtigen, die einen Schatten werfen könnten, wobei hier ein Sicherheitsabstand gewählt wurde.

gespeichert wird, sondern wohl ins Netz eingespeist werden müsste. Je feiner zeitlich aufgelöst die Bilanz durchgeführt werden kann, umso realistischer sind daher die Abschätzungen.



Abb. 4: ausgewählte Citybike-Stationen und Solarpotenziale am Standort (eigene Darstellung AIT)

Bei der Analyse des Solarpotenzials ist darauf zu achten, dass sowohl bei Stationen, die unter Unterführungen/Brücken liegen als auch bei Stationen unter Bäumen ein Solarpotenzial berechnet wird (z.B. bei der Station Praterstern und Hauptbahnhof West). In dieser Arbeit wurden solche Stationen nicht berücksichtigt, wodurch sich letztlich 29 analysierte Stationen ergaben.

Die folgende Abbildung 5 zeigt die mittleren stündlichen Solarpotenziale der dieser 29 Stationen, wobei die Stationen Hauptbahnhof und Sankt-Elisabeth-Platz farblich hervorgehoben sind. Für die meisten Stationen ergibt sich ein Tagesverlauf ähnlich jenem des Hauptbahnhofs, was einem ungestörten Solarpotenzialverlauf entspricht. Die Station Sankt-Elisabeth-Platz zeichnet sich durch eine Potenzialminderung am Vormittag aus, die durch Bäume und Gebäude im Osten der Station verursacht wird.<sup>6</sup>

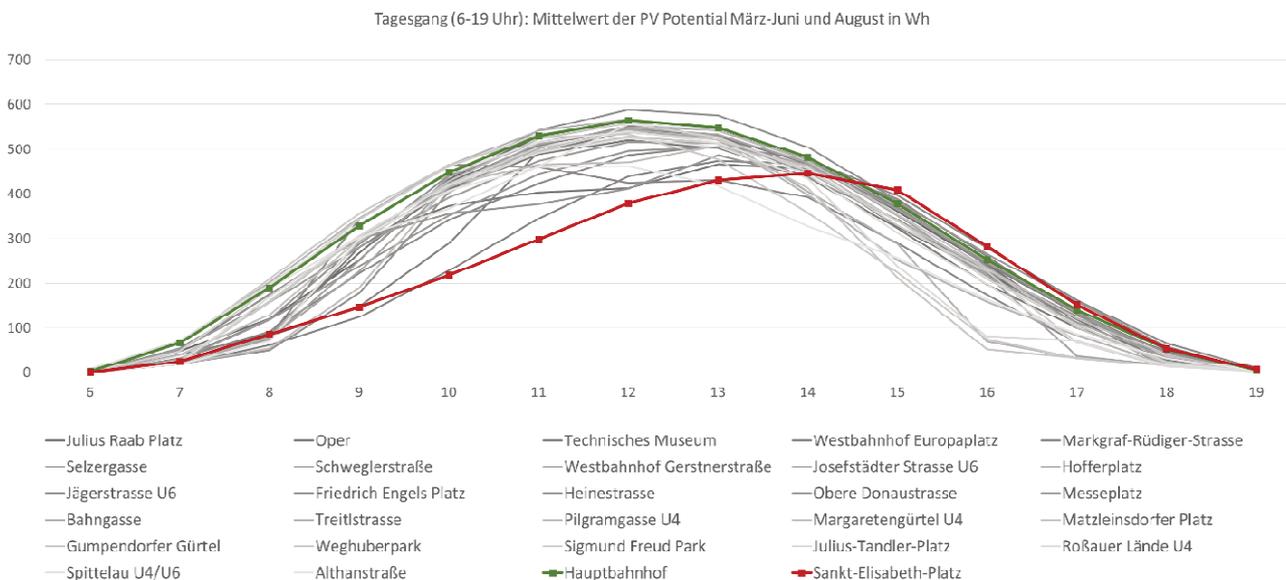


Abb. 5: mittleres Solarpotenzial der ausgewählten Stationen (Source: Berechnungen AIT); wobei der Wert um 6:00 Uhr den Solarenergieeintrag 6:00-7:00 und der Wert um 19:00 Uhr jenen zwischen 19:00-20:00 Uhr darstellt)

Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der ausgewählten Stationen in Prozent zum Maximalwert der mittleren Summenwerte (21.3., 21.6., 21.8.) der Solarstrahlung in den Stunden zwischen 6:00 Uhr und 20:00 Uhr. Der

<sup>6</sup> <https://www.google.at/maps/@48.1908095,16.375692,54m/data=!3m1!1e3>

maximale mittlere Tageswert liegt dabei bei rund 4kWh/d für den guten Standort und ca. 3kWh/d für den schlechten Standort.

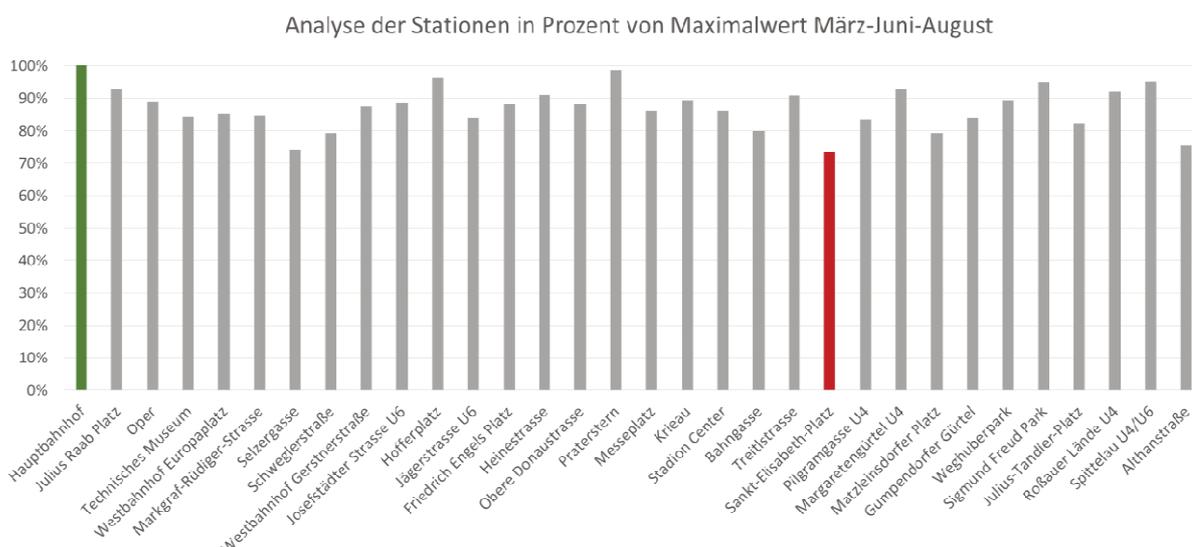


Abb. 6: Vergleich Solarpotenziale bezogen auf Stationsmaximum der ausgewählten Stationen (Source: Berechnungen AIT)

### 5.2.2 Allgemeine ökonomische Analyse

Eine ökonomische Analyse kann auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden. Eine oft verwendete Methode dabei ist die sogenannte Kapitalwertmethode, die wohl zu den wichtigsten Methoden der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung zählt. Der Kapitalwert einer Investition ist die Summe der Barwerte aller durch diese Investition verursachten Zahlungen. Dazu gehören sowohl Ein- als auch Auszahlungen. Der Barwert ist der Wert, den zukünftige Zahlungen in der Gegenwart besitzen.<sup>7</sup> Der Photovoltaik-Rechner der Österreichischen Energieagentur<sup>8</sup> nützt diese Methode und wurde im Rahmen der Analyse als Vergleichstool verwendet, wobei die folgenden Berechnungen mittels R-Statistik selbst durchgeführt wurden, da dadurch eine höhere Flexibilität in den Analysen möglich war. Die wesentlichen Parameter für die Berechnung sind:

- die solare Einstrahlung,
- die Investitionskosten und die laufenden Kosten (Wartungskosten),
- Wechselrichtertausch bei netzgekoppelten Anlagen (ca. im 13. Betriebsjahr)
- die Anlagengröße in kWp,
- die Förderung,
- der Strompreis und der Einspeisetarif (Überschusseinspeisung),
- der Anteil der Strom-Eigennutzung,
- die angenommene Strompreissteigerung und der
- angenommene kalkulatorische Zinssatz

Die verwendete Methode konzentrierte sich v.a. auf den Anteil der Strom-Eigennutzung und die Größe der Anlage, da diese Faktoren durch den Anlagenbetreiber verändert werden können. Abbildung 7 zeigt einen Vergleich des Kapitalwertverlaufes einer Anlage mit der Größe 2kWp (links) und einer Anlage mit 3kWp (rechts). Beide Anlagen wurden unter der Annahme berechnet, dass es sich um einen guten Standort (jährliche solare Einstrahlung 1100kWh/m<sup>2</sup>) handelt. Die spezifischen Investitionskosten wurden mit 1500€ pro kWp angenommen. Dieser Vergleich soll zeigen, dass die Anlagengröße einen entscheidenden Einfluss hat.

<sup>7</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Barwert>

<sup>8</sup> [https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/pv\\_rechner.html](https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/pv_rechner.html)

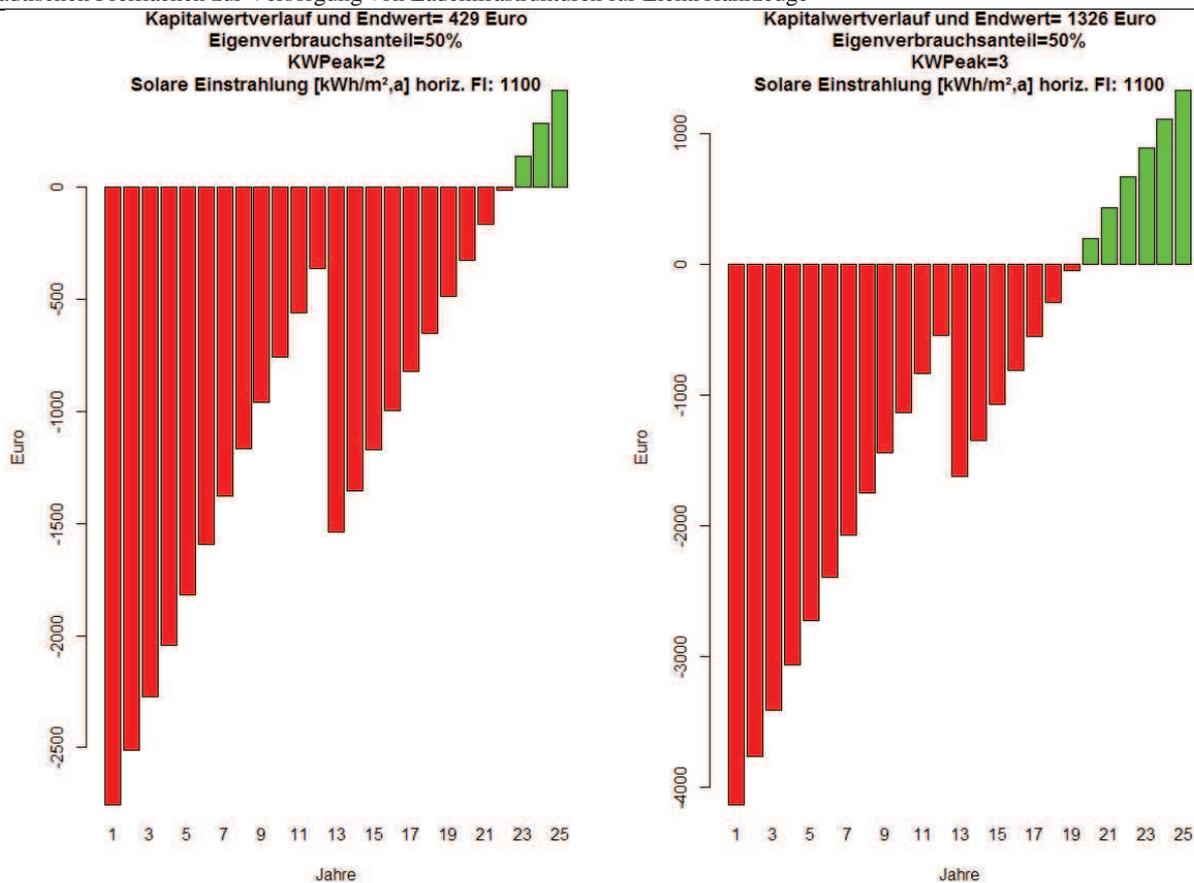


Abb. 7: Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedenen Anlagengrößen (Source: Berechnungen AIT)

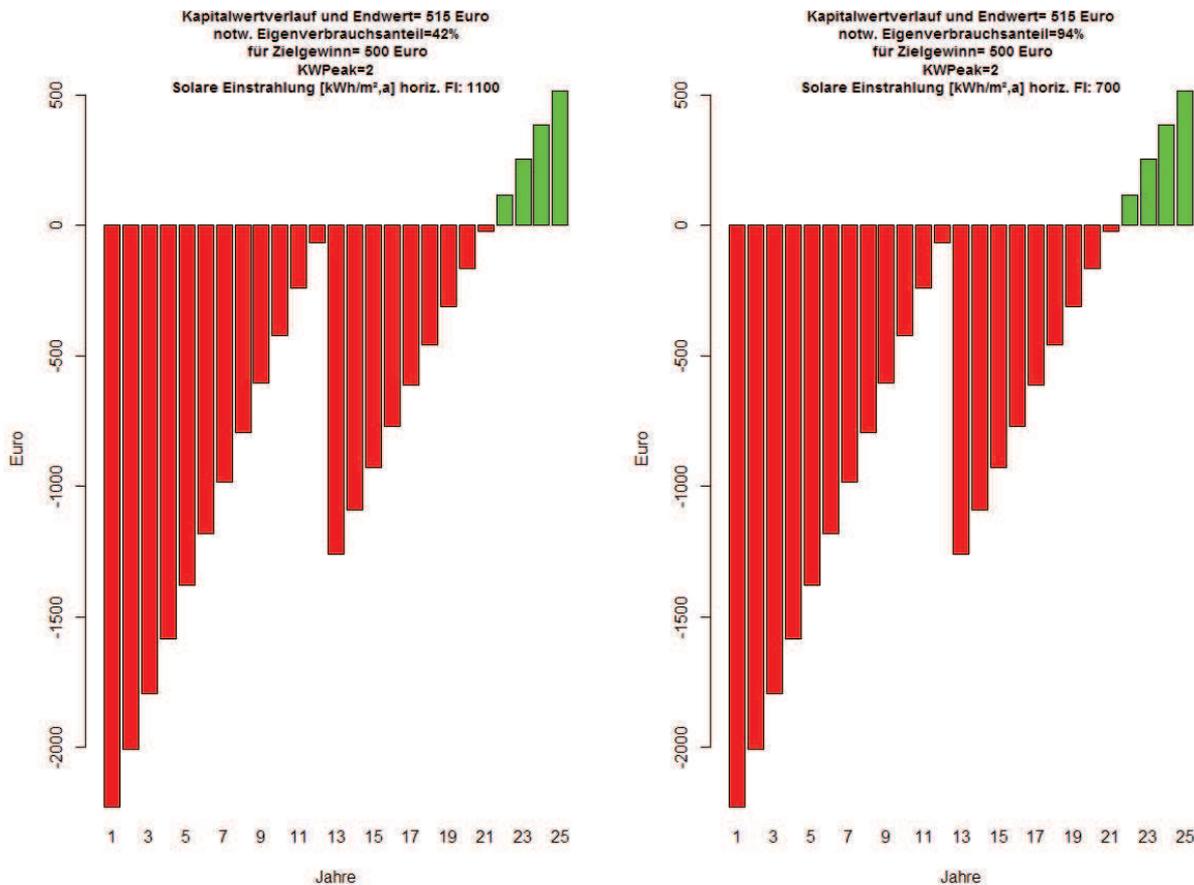


Abb. 8: Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Strom-Eigennutzungsanteile (Source: Berechnungen AIT)

Handelt es sich um einen schlechten Standort, wie etwa bei der Station Sankt-Elisabeth-Platz, mit einem Ertrag von rund 700kWh/m<sup>2</sup> und Jahr, ist weder die 2kWp noch die 3kWp Anlagen ausreichend (ohne Förderung), wenn man von einer 50% Strom-Eigennutzung ausgeht. In diesem Fall sollte eine hohe Strom-Eigennutzung angestrebt werden. Bei der Berechnung (vgl. Abbildung 8) wurde angenommen, dass die Anlagen eine Förderung von 275 € pro kWp erhalten und analysiert, wie hoch die Strom-Eigennutzung sein müsste, um einen Gewinn von mindestens 500€ zu erzielen. Die Anlage am guten Standort erreicht schon mit rund 42% Eigennutzungen Zielertrag (links). Beim schlechten Standort müssten fast 95% des Stroms selbst genutzt werden (rechts). In der Berechnung wurde nicht berücksichtigt, dass bei der Anlage mit schlechtem PV-Potenzial wesentliche Kosten eingespart werden könnten, wenn auf einen Wechselrichter (der während der Lebensdauer zudem getauscht werden muss) verzichtet werden könnte. Dafür wäre aber entweder eine sehr gute Bedarfs- und Produktionsübereinstimmung notwendig, damit die hohe Strom-Eigennutzung möglich ist, oder es müssten Speicherakkus installiert sein, was zusätzliche Kosten mitsich bringen würde.

Die oben angeführten Berechnungsbeispiele stellen keine exakte Berechnung der Wirtschaftlichkeit dar, da auch Kosten durch notwendige Unterkonstruktionen anfallen können, um die Anlagen vor Glasbruch und daraus folgenden etwaigen Personenschäden abzusichern. Des Weiteren wurde keine mögliche Strompreiserhöhung in den nächsten 25 Jahren berücksichtigt, weil eine solche unserer Meinung nach momentan nicht genau angegeben werden kann und die damit einhergehenden Auswirkungen derzeit nicht abgeschätzt werden können.

In der weiteren Folge wurden auf Stundenbasis Szenario-Berechnungen durchgeführt, inwieweit der Energiebedarf im Tagesverlauf und die Energieproduktion (für die zwei Standorte – gute und schlechte Solarpotenziale) zusammenpassen. Der Tagesverlauf der Entlehnungen wurde dabei aus den Gewista Daten abgeleitet und dazu verwendet, die Anzahl der Fahrten pro Rad und Tag auf die Stunden aufzuteilen. Die Tabelle 1 enthält die wichtigsten Annahmen und Kenngrößen für diese Szenario-Berechnungen.

Parameter	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Anzahl der Fahrten pro Rad und Tag	2,3*	5	10.8**	5
Durchschnittliche Strecke pro Fahrt in [km]	4***	4	4	4
Anzahl der Räder pro Station in [Stück]	20	20	20	20
Energieverbrauch pro km in [Wh/km]	11*	11	11	11
Anlagengröße in kWp	2	2	2	1
Optimale Ausrichtung der Station****	nein	nein	nein	nein
Solarfläche pro Rad in [m <sup>2</sup> /Stellplatz]	0,68	0,68	0,68	0,34

Tabelle 1: Wichtige Annahmen und Kenngrößen für die Berechnung. \*der Wert 2,3 wurde aus den Gewista Daten abgeleitet, 2014; \*\*Wert für Barcelona aus Table 3 in Fogelberg, 2014; \*\*\* Annahme der Verdoppelung der durchschnittlichen Fahrtlängen im Vergleich zu Leitgöb, 2016; \*\*\*\*bei optimaler Ausrichtung könnte ein erhöhter solarer Gewinn erzielt werden, ist aber nicht immer möglich v.a. bei schon existierenden Citybike-Stationen

Die folgende Abbildung 9 stellt die Bilanz zu jeder Stunde im Tagesverlauf für die vier Szenarien dar. In den Nachtstunden liegt der Bedarf über dem solaren Angebot, wodurch sich eine negative Bilanz ergibt, die während den Tagesstunden (bei Sonnenschein) in eine positive Bilanz umschlägt.



Abb. 9: Szenariovergleich der Bilanz pro Stunde im Tagesverlauf der Solaren Stromproduktion minus Verbrauch durch E-Bikes (Source: Berechnungen AIT)

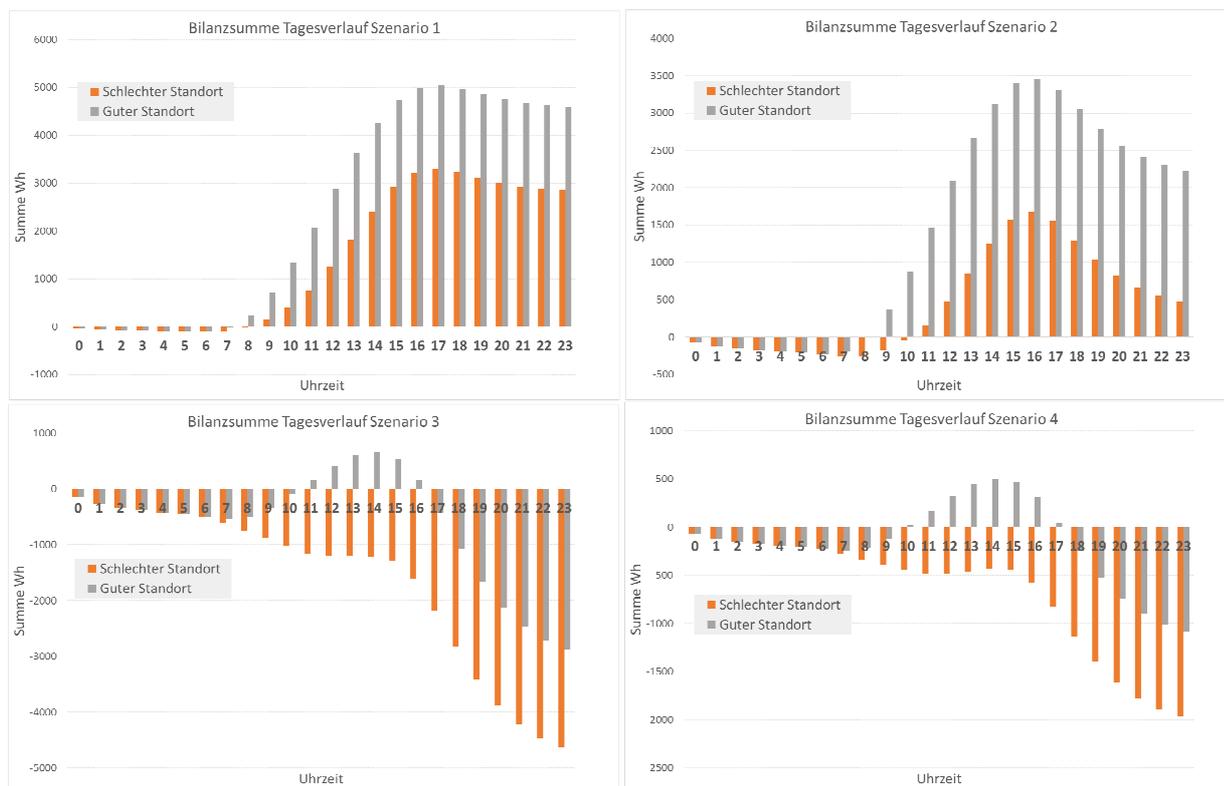


Abb. 10: Vergl. der Bilanz der Solaren Stromproduktion minus Verbr. von E-Bikes versch. Szenarien (Source: Berechnungen AIT)

Abbildung 10 stellt im Unterschied zu Abbildung 9 nicht die Bilanzen pro Stunde, sondern die Bilanzsumme bis zur jeweiligen Stunde dar. Dies bedeutet, solange ein positiver Wert vorliegt, ist Strom produziert aus Solarenergie, vorhanden. Der Wert am Ende eines Tages ist dann der Startwert für den nächsten Tag. Bei der Darstellung wurde von einem Startwert null um 0:00 Uhr ausgegangen, um die Darstellung zu vereinfachen. Wie der Szenariovergleich zeigt, ist bei Szenario 1 und 2 am Ende des Tages mehr Energie vorhanden, als benötigt wird und somit ein neuer Startwert um 0:00 vorhanden, der größer null ist. Dadurch könnte

zumindest in Szenario 1 ein Tag ohne PV-Strom aus der Sonne am schlechten Standort und 2 Tage am guten Standort überdauert werden. Dabei sollte auch bedacht werden dass an bewölkten Tagen auch PV-Strom produziert wird und an regnerischen Tagen die Nachfrage nach E-Bikes reduziert sein wird. Diese Faktoren konnten aber in der durchgeführten ersten Analyse nicht berücksichtigt werden, sollten aber in einer detaillierteren Analyse betrachtet werden.

### 5.2.3 Neue Stationen – Analyse

Um geeignete Standorte für neue Stationen zu identifizieren wurden anhand der Stationsdichte – dem Abstand der Stationen zueinander – und dem Solarpotenzial entlang der ausgewiesenen Radwege mögliche Standorte ermittelt. Die Dichte des gesamten Bike-Sharing Netzes gibt Auskunft über die Versorgungsqualität. Um eine hochwertige Versorgung zur Verfügung zu stellen sollten eine fußläufige Erreichbarkeit der Stationen gewährleistet werden. Für ein ausreichend dichtes Netz gibt das Institut für Transportation & Development Policy einen Stationsabstand von durchschnittlich 300m an (Leitgöb, 2016, zitiert nach ITDP, 2013).

In Wien befinden sich ein Viertel aller Stationen in einem Abstand von etwa 300m zueinander, die Hälfte sind innerhalb von 400m zu erreichen. Jene Stationen, die mehr als 500m von der nächsten entfernt liegen, befinden sich im Randbereich des Stationsnetzes (Leitgöb, 2016). Die Distanz entscheidet u.a. darüber, welche Mobilitätsangebote im städtischen Raum wahrgenommen werden – sei es für Einkauf, Freizeitbeschäftigung oder Alltagswege. Dabei werden diese Entscheidungen davon bestimmt, den Energieverbrauch des Körpers möglichst gering zu halten, da der Fußgänger stark distanzempfindlich ist (Leitgöb, 2016, zitiert nach Knoflacher, 2012 und Knoflacher, 1985).

In Abbildung 11 wird die methodische Vorgehensweise zur Standortfindung für mögliche neue Stationen, die ein Solarpotenzial von über 700 kWh/m<sup>2</sup> und Jahr aufweisen, skizziert. Dabei werden in erster Linie nur die Bereiche betrachtet, die außerhalb der fußläufigen Reichweite (Distanz von 300m Luftlinie) von bestehenden Citybike-Stationen liegen. Exemplarisch wird hier die Sechshauser Straße im 15. Bezirk identifiziert, die ein gutes Solarpotenzial entlang des ausgewiesenen Radweges aufweist.

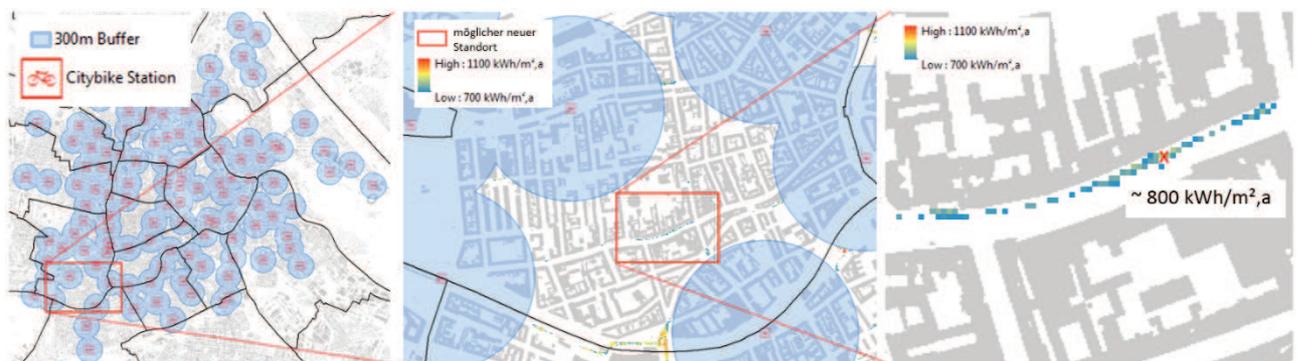


Abb. 11: Beispiel eines mögl. neuen Standorts in der Sechshauser Straße, 15. Bezirk, mit PV-Anlage (Quelle: eigene Analysen AIT)

Die oben erläuterte Analyse könnte durch die Berücksichtigung der Topografie (E-Bikes sind v.a. dort hilfreich, wo Steigungen zu überwinden sind) und Auslastung der Stationen in der Umgebung (müssen Räder der umliegenden Stationen oft umverteilt werden und würde eine neue Station helfen, die Nutzung der anderen auszugleichen) verfeinert werden.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der mögliche Beitrag von PV in urbanen Freiräumen zur erneuerbaren Energiegewinnung ist unbestritten. Das Projekt Syn[En]ergy analysiert, welche Nutzungskonzepte besonders viele Vorteile und Synergieeffekte erwarten lassen. Im Zuge des Projektes wurden Potenziale für verschiedenen PV-Anwendungsarten untersucht. Die in dieser Arbeit dargestellte Nutzung des PV-Stroms zur Bedarfsdeckung für E-Citybikes zeigt, dass mehrere Faktoren wesentlich sind und v.a. Anlagen auf schlechten Standorten (<700 kWh/m<sup>2</sup>,a) mit der Wirtschaftlichkeit zu kämpfen haben werden. Sie zeigt aber auch, dass Szenarien möglich sind, bei denen eine Wirtschaftlichkeit gegeben ist. Diese beinhalten z.B. eine verstärkte Nutzung von E-Bikes (E-

Citybikes) im Vergleich zu jener der derzeitigen Citybikes<sup>9</sup> um eine hohe PV-Strom Eigennutzung zu gewährleisten. Es kann aber angenommen werden, dass die Nutzung beim Einsatz von E-Bikes steigt, wobei dies stark vom Angebot bzw. der Stationsdichte abhängt. Die beschriebenen Analysen sollten noch verfeinert werden, wobei z. B. eine mehrtägige Bilanz, die auch typische Wetterverläufe und dessen Einfluss auf die PV-Strom Produktion und E-Bikenutzung berücksichtigt, analysiert werden sollte. Reale Feldversuche könnten diese Analyse zusätzlich verfeinern, um noch offene Fragen klären zu können.

## 7 ACKNOWLEDGEMENTS

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projekts Syn[En]ergy durchgeführt. Syn[En]ergy wird vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) im Rahmen der „Stadt der Zukunft“-Initiative gefördert (FFG). Wir möchten uns zudem noch bei Herrn Dechant und der Gewista Werbegesellschaft für die Daten bedanken.

## 8 LITERATUR

- BMVIT: Elektromobilität, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, URL: <https://www.bmvit.gv.at/verkehr/elektromobilitaet/index.html>, 2017.
- ESRI: Area Solar Radiation, URL: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/modeling-solar-radiation.htm>, 2017.
- CHOW, A., FUNG, A. S., LI, S.: GIS Modeling of Solar Neighborhood Potenzial at a Fine Spatiotemporal Resolution, Buildings 2014, 4, pp 195-206, 2014.
- FOGELBERG, F.: Solar Powered Bike Sharing System with Electric Bikes, An Overview of the energy system and the technical system design, Master thesis within the Master's Programme Industrial Ecology, Göteborg, Sweden, 2014.
- GEWISTA: Entlehndaten Citybike Wien der Gewista Werbegesellschaft mbH, 2017.
- ITDP: Seven World-Class Cities Are Riding Tall in the Bike-Share Boom; „The Last Mile“ Can Be Solved Without Cars In More Places than Ever Before. Institute for Transportation & Development Policy. URL: [https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2013-12/bc-swc120213.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2013-12/bc-swc120213.php), 2013.
- KNOFLACHER, H.: Katalysatoren für Nichtmotorisierte. Wien. 1985
- KNOFLACHER, H.: Siedlungsplanung, Grundlagen der Verkehrs- und Siedlungsplanung, Wien. 2012
- LEITGÖB, M.: Das Zu- und Abgangsverhalten bei Citybike-Wien-Verleihstationen, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2016.
- OßWALD, M.: Erstellung eines GIS-basierten landesweiten Solarkatasters für Freilandflächen in Baden-Württemberg und Durchführung einer Solarpotenzialanalyse, Bachelorthesis, Studiengang Kartographie und Geomatik, 2013.
- PACCAGNEL, K.: Potenzialmodelle für Solarenergie, Seminararbeit, Naturwissenschaftliche Fakultät der Paris Lodron Universität Salzburg, Fachbereich Geographie und Geologie, o.J.
- SCHRENK, M., BENEDIKT J., EGGER, T., EIZINGER, C., FARKAS, A.: Bus Stop 3.0–Bus Stop of the Future–Multifunctional Centers for Regional Development. [http://www.geomultimedia.org/archive/CORP2010\\_219.pdf](http://www.geomultimedia.org/archive/CORP2010_219.pdf), 2010.
- STADT WIEN: Digitales Oberflächenmodell, URL: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/geodaten/als/>, MA-41 Stadtvermessung.

<sup>9</sup> derzeit durchschnittlich 2,3 Nutzungen pro Rad und Tag mit einer durchschnittlichen Fahrtstrecke von rund 2 km, siehe dazu auch Leitgöb, 2016