Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

# 238_Normwartehalle mit Photovoltaikanlage

## Technische und finanzielle Umsetzung einer PV-Anlage in Standard-Wartehallen der Basler Verkehrs-Betriebe

Schlussbericht

**Rolf Frömcke, Basler Verkehrs-Betriebe BVB / Infrastruktur**
Münchensteinerstrasse 87, 4452 Basel, rolf.froemcke@bvb.ch, www.bvb.ch

**Impressum**

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Stany Rochat, BAV

Projektnummer: 238
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 06.12.2024

# Inhalt

Executive Summary in Deutsch ..... 3
Executive Summary in Französisch ..... 3
Executive Summary in Englisch ..... 3
1. Ausgangslage ..... 4
2. Ziel der Arbeit ..... 4
3. Projektbeschrieb ..... 5
4. Betrieb und Leistungsdaten ..... 6
5. Diskussion ..... 8
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen ..... 9
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis ..... 9
Literaturverzeichnis ..... 9
Anhang ..... 9

## Liste der Abbildungen

Abbildung 1: Elektroschema WH ..... 5
Abbildung 2: Übersichtsplan mit Standort ..... 5
Abbildung 3: Verschattung 20. Oktober 12:00 Uhr ..... 6
Abbildung 4: Produzierte Strommenge in Wh ..... 7

## Executive Summary in Deutsch

Das Pilotprojekt prüft und bewertet die Umsetzung einer Photovoltaikanlage in die Standard-Wartehallen der Basler Verkehrs-Betriebe.

Die Pilotanlage mit 1'329 Wp wurde an der Haltestelle Markthalle realisiert.

Der tatsächliche Ertrag von 760 kWh im den Beobachtungszeitraum lag unter dem prognostizierten Wert. Mit einer entsprechenden Korrektur für die unter dem Durchschnitt liegenden Sonnenstunden, kann aber eine Performance Ratio von 65% angenommen werden.

Der Selbstversorgungsgrad liegt bei etwa 55%, wobei der restliche Strom mangels Rückspeisevergütung keine finanziellen Auswirkungen hat.

Aufgrund der spezifischen Lage und Bedingungen, welche sowohl der Wartehallenkonstruktion als auch den innerstädtischen Verhältnissen geschuldet sind, kann die Kleinstanlage nicht kostendeckend betrieben werden.

Die Anlage ist also technisch machbar, jedoch aufgrund hoher Investitionskosten und niedriger Erträge nicht rentabel.

Empfohlen wird, von weiteren PV-Anlagen in Standard-Wartehallen der BVB abzusehen, da weder wirtschaftliche noch ökologische Vorteile gegeben sind.

## Executive Summary in Französisch

Le projet pilote teste et évalue la mise en œuvre d'une installation photovoltaïque dans les abribus standard de la Basler Verkehrs-Betriebe.

L'installation pilote de 1'329 Wp a été réalisée à l’arrêt Markthalle.

Le rendement réel de 760 kWh relevé pendant la période d'observation était inférieur aux prévisions. Avec une correction correspondante pour les heures d'ensoleillement inférieures à la moyenne, on peut toutefois admettre un ratio de performance de 65%.

Le taux d'autosuffisance est d'environ 55%, et le surplus d'électricité ne présente pas d’avantage financier en raison de l'absence de rémunération de la réinjection dans le réseau.

En raison de la situation de l’abribus en plein centre-ville, ainsi qu’aux conditions spécifiques, notamment liées à sa construction, la petite installation ne peut pas être exploitée de façon rentable.

L'installation est donc techniquement réalisable, mais elle n'est pas rentable en raison des coûts d'investissement élevés et des faibles revenus générés par son exploitation.

Il est recommandé de ne pas installer d'autres installations photovoltaïques dans les abribus standard de la BVB, car elles ne présentent aucun avantage économique ou écologique.

## Executive Summary in Englisch

The pilot project examines and evaluates the implementation of a photovoltaic system in the standard tram waiting booths of the Basler Verkehrs-Betriebe.

The pilot system with an output of 1,329 Wp was installed at the Markthalle stop.

The actual yield of 760 kWh during the observation period was below the predicted value. However, with an adjustment for the below-average hours of sunshine, a performance ratio of 65% can be assumed.

The self-sufficiency rate is around 55%, while the remaining electricity having no financial impact due to the lack of feed-in compensation.

Due to the specific location and conditions, which are attributable to both the design of the tram booth construction and the inner-city conditions, the small system cannot be operated cost-effectively.

The system is therefore technically feasible, but not profitable due to high investment costs and low yields.

It is recommended to refrain from installing further PV systems in standard BVB waiting booths, as there are no economic or ecological benefits.

## 1. Ausgangslage

Im Zuge von diversen Umgestaltungsprojekten werden in den nächsten 5 Jahren ca. 200 Normwartehallen des Typs Parapluie auf dem Netz der BVB neu erstellt.
Die Wartehallen sind ein eigens für die BVB designtes Produkt, welches aufgrund seines Glasdaches als mögliche Fläche für den Einbau von Photovoltaikanlagen in Frage kam.
Als zwingende Vorgabe galt, dass das Design nicht, oder nur minimal verändert werden darf.
Innerhalb eines Pilotprojektes sollte somit die technische und die kommerzielle Machbarkeit der Integration von Photovoltaik für diese speziellen Wartehallen aufgezeigt werden.

## 2. Ziel der Arbeit

I. Nachweis der technischen Machbarkeit ohne wesentliche Veränderung des Designs
II. Prüfung und Beurteilung der finanziellen Aspekte aufgrund tatsächlicher Leistungswerte

# 3. Projektbeschrieb

## a. Technische Spezifikation der Anlage

Um das Design nicht wesentlich verändern zu müssen, wurden keine fertigen Module verwendet. Zwischen den Dachgläsern (VSG aus 2 x 12 mm TVG) wurden einzelne Solarzellen verbaut und entsprechend verdrahtet. Pro Dachglas (Modul) wurden 96 Zellen mit einer Nennleistung von 443 Wp eingebaut. Der im Pilotprojekt verbaute Wartehallentyp Duplex ist mit 3 solchen Gläsern ausgerüstet und verzeichnet bei einer Gesamtfläche von 8.9 $m^2$ eine Nennleistung der gesamten Anlage von 1'329 Wp.
Im unteren Bereich einer Rückwand wurde für jedes Modul ein separater Micro-Wechselrichter eingebaut, welche via einer Unterverteilung an das Verteilnetz der Haltestelle angeschlossen wurden.
Zur Datenspeicherung und Übermittlung wurde ein PLC Gateway mit separatem Datenlogger verbaut.

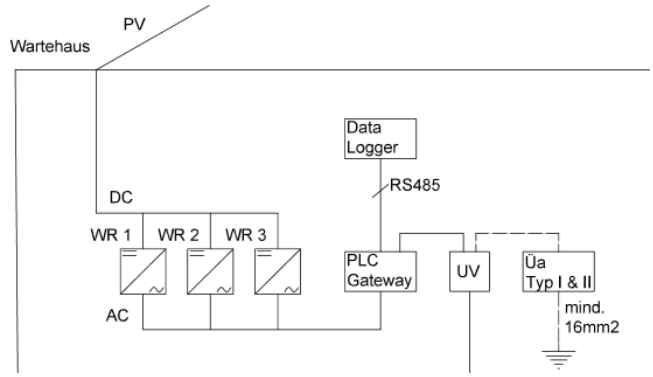


*Abbildung 1: Elektroschema WH*

Aufgrund der spezifischen Situation vor Ort konnte kein Zähler des Stromlieferanten IWB eingebaut werden. Es erfolgt somit keine tatsächliche Verbrauchs- oder Rückspeisungserfassung. Dieser Umstand wird beim Umbau der restlichen Haltekanten der Haltestelle Markthalle, voraussichtlich im Jahr 2027, behoben.

## b. Standort der Anlage

Die Duplex-Wartehalle mit der Pilotanlage wurde an der Haltestelle Markthalle, Haltekante S (Richtung Bahnhof SBB) aufgestellt.

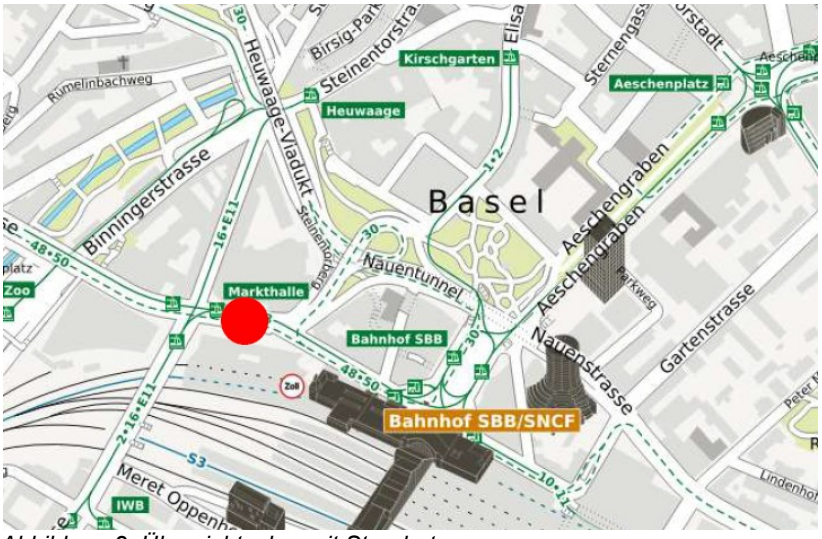


*Abbildung 2: Übersichtsplan mit Standort*

Der Standort gilt bezüglich eines maximalen Ertrags nicht als optimal. Weder die Ausrichtung noch die umliegenden Gebäude gewähren eine optimale oder zeitlich maximale Sonneneinstrahlung (siehe Abbildung 3). Aber da optimale Standorte in innerstädtischen Verhältnissen eher die Ausnahme darstellen, entspricht er den Anforderungen an ein Pilotprojekt.

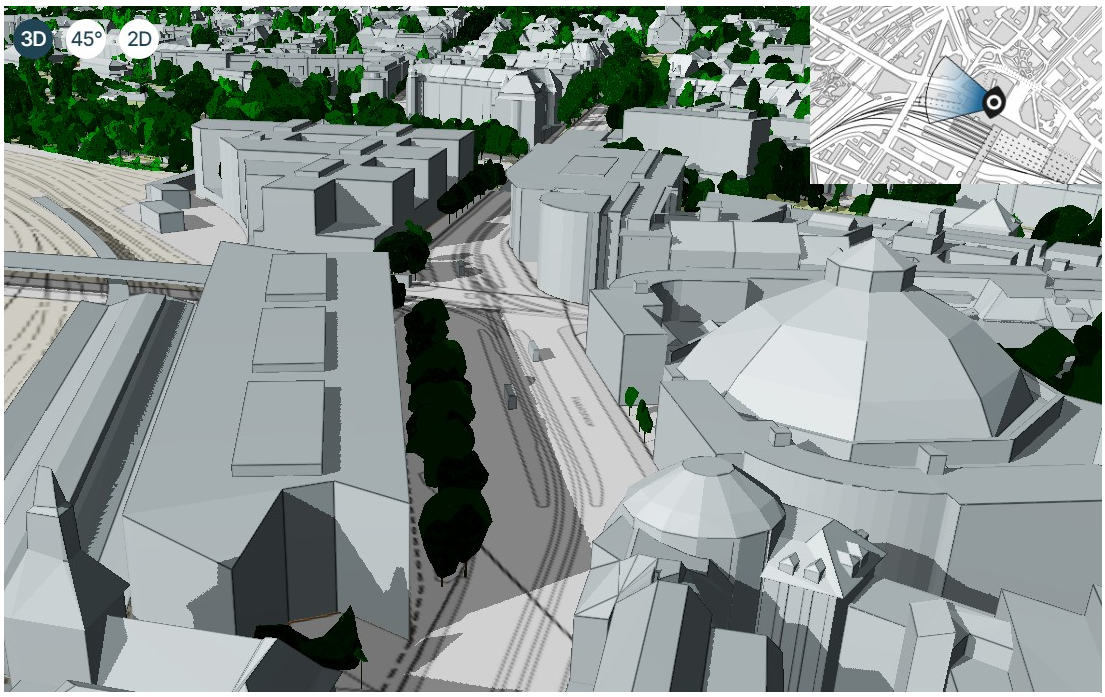

*Abbildung 3: Verschattung 20. Oktober 12:00 Uhr*

**c. Ertragserwartung**

Die dem Pilotversuch zu Grunde liegenden Abschätzungen hatten eine Jahresleistung von 1'280 kWh (bei 1'600 kWp) veranschlagt. Für die konkret realisierte Anlage musste diese Abschätzung korrigiert werden. Mit einem für Basel durchschnittlichen Wert für die jährliche Globalstrahlung von 1'000 kWh/m$^2$ resultiert für die Leistung von 1'329 kWp einen maximal möglichen Ertrag von 1'329 kWh pro Jahr. Die Performance Ratio (PR) der Anlage wurde, unter der Berücksichtigung der Lage und Ausrichtung, unter 70% erwartet. Dies entspricht einem Ertrag von ca 900 kWh/a.

## 4. Betrieb und Leistungsdaten

**a. Inbetriebnahme**

Die Wartehalle mit PV-Anlage wurde im zwischen März und Juni 2022 erstellt und im Oktober in Betrieb genommen.
Aufgrund eines Fehlers bei einer Anpassung der Elektroverteilung wurde die Messung der Anlage im Frühjahr 2023 unterbrochen. Da keine Alarmierung vorhanden war, wurde dieser Fehler erst im Herbst bemerkt. Leider betraf die Fehlinstallation auch den Datenlogger, wodurch für die ertragsreichen Sommermonate keine Daten zur Verfügung standen. Da diese für die Gesamtabschätzung unerlässlichen waren, wurde der Pilotbetrieb um ein Jahr verlängert.
Die Anlage liefert seit Beginn zuverlässig Strom und nun auch vollständig dokumentierte Ertragsdaten.

**b. Messzeitraum**

Als Grundlage werden die Messdaten von Oktober 2023 bis September 2024 verwendet.
Im Beobachtungszeitraum lagen die Sonnenstunden[1] bei der Messstation Basel/Binningen bei ca. 80% der Durchschnittswerte der letzten Jahre. Dies trifft auch für die ertragsreichen Monate April bis September 2024 zu.

**c. Ertrag**

Im Beobachtungszeitraum produzierte die Anlage insgesamt 760 kWh. Davon entfallen 82% erwartungsgemäss auf die Monate April bis September.

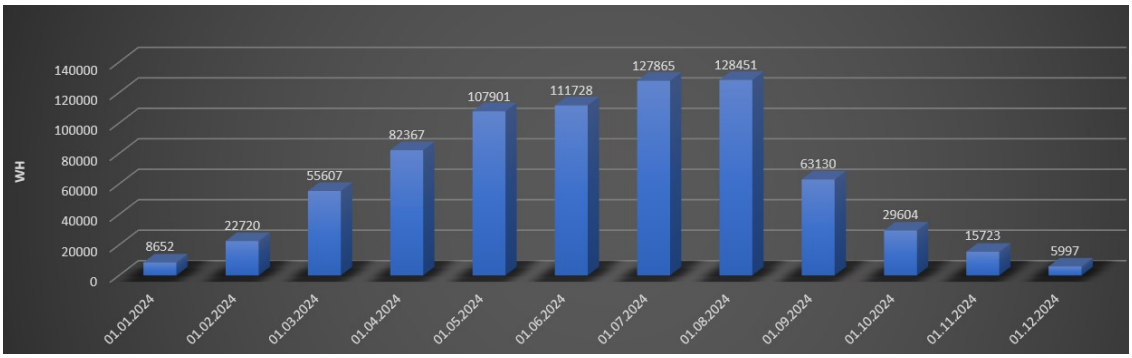


*Abbildung 4: Produzierte Strommenge in Wh*

Der Performance Ratio (PR) liegt somit für die Beobachtungsperiode gesamthaft bei 57%.
Da der Beobachtungszeitraum bezüglich Sonnenscheindauer deutlich unter dem mehrjährigen Mittel lag, dürfte die mittelfristige jährliche Stromproduktion höher liegen. Als Anhaltspunkt für den Korrekturfaktor ist die meteorologisch festgehaltene Sonnenscheindauer nicht 1:1 auf die Stromproduktion anwendbar, da auch bei diffusen Lichtverhältnissen eine Reststrahlung genutzt werden kann. Auch bei Tagen ohne Sonnenschein liefert die Anlage 30% (Sommermonate) ihrer maximalen Leistung. Als Korrekturfaktor für die im 2024 geringe Sonnenscheindauer wird daher 1.15 gesetzt.
Basierend auf dieser Annahme kann der tatsächlich durchschnittlich resultierende Ertrag mit ca. 875 KWh/a angenommen werden. Dies entspricht einer PR von 65% und damit in etwa der Prognose von 900 kWh.

**d. Verbrauch**

Die Haltestelleninfrastruktur umfasst folgende Verbraucher, welche an die Verteilung angeschlossen sind:

- Billettautomat: 1'800 kWh/a (Dauerverbrauch)
- Digitale Fahrgastinformation: 730 kWh/a (Dauerverbrauch)
- Beleuchtung Wartehalle: 300 kWh/a
- Photovoltaikanlage (Wechselrichter, Datenlogger, Gateway): 125 kWh/a (Dauerverbrauch)

Insgesamt verbraucht diese Teilhaltestelle damit knapp 3'000 kWh/a.

**e. Selbstdeckungsgrad**

Da weder Bezug noch Rückspeisung ins Netz von IWB gemessen werden, kann der Anteil der tatsächlich selbst genutzten Energie nur abgeschätzt werden.

Die Dauerverbraucher Billettautomat, DFI und PV-Anlageteile verbrauchen pro Stunde zusammen 297 W. Die Produktion der PV-Anlage überschreitet an den meisten Sonnentagen diesen Wert. Gemäss Abschätzung konnten ca. 350 kWh (45%) der Jahresproduktion nicht direkt genutzt werden. Da eine Rückspeisezählung fehlt, ist dieser Anteil der Stromproduktion für die BVB verloren.

**f. Kosten**

Der Prototyp schlägt mit Kosten von CHF 55'000.- zu Buche. Dies dient nicht als Datenbasis für eine Ertragsberechnung.
Mit folgenden Aufwendungen ist für jede weitere Anlage zu rechnen [CHF exkl. MWSt.]:
Investitionskosten: 8'000.- (Solaranlage CHF 7'000.- plus Elektroinstallation und allgemeine Projektkosten von CHF 1'000.-)
Jährliche Unterhaltskosten: 95.- (Reinigung Dachglas 70.- / Wartung elektrische Anlagen 25.-)
Für PV-Anlagen kann eine Lebensdauer von 20 Jahren angenommen werden. Legt man die Investitionskosten linear um, so resultieren inkl. Unterhalt CHF 495.- pro Jahr.
Auf der Ertragsseite liefert die Anlage im Durchschnitt 875 kWh/a. Auf die gesamte Lebensdauer von 20 Jahren muss das aufgrund der Alterung im Schnitt auf 90% reduziert werden.
Somit resultiert ein jährlicher Ertrag von 790 kWh/a. Der Strompreis schwankte in den letzten Jahren. Für die Berechnung legen wir einen Tarif von CHF -.35 /kWh zu Grunde.

Mit der Annahme, dass lediglich 55% des Stroms direkt selbst genutzt werden können und keine Rückspeisevergütung möglich ist, ergibt sich folgende Ertragsrechnung:
0.55 x 790 x 0.35 = 152.- pro Jahr.

Den jährlichen Kosten von CHF 495.- steht ein Ertrag von CHF 152.- gegenüber. Es resultiert ein Betriebsergebnis von CHF -343.- pro Jahr.
Selbst wenn der gesamte Strom selbst genutzt werden könnte, resultierte ein Ergebnis von CHF -219.- /a. Auch eine allfällige Rückspeisung der nicht selbst genutzten 45% des produzierten Stroms würde dieses Ergebnis nur um ca. CHF 50.- verbessern.

Nicht berücksichtigt sind die Kosten für den Prototyp, sowie für Rückbau und Entsorgung der Anlage.

## 5. Diskussion

### a. Zielerreichung I: technische Machbarkeit

Die Anlage ist grundsätzlich ohne Probleme in die bestehende Struktur integrierbar. Bezüglich technischer Einzelheiten kann die Anlage noch optimiert werden. Zum einen sollte auf einen Wechselrichter reduziert und die Verdrahtung entsprechend angepasst werden, damit der Einfluss einer partiellen Verschattung minimiert werden kann. Dies wurde in der Preisgestaltung für die finanziellen Betrachtungen bereits berücksichtigt.

### b. Zielerreichung II: finanzielle Aspekte

Die realisierte PV-Anlage weist ein sehr grosses Defizit von knapp CHF 2'700.- pro Jahr aus (Laufzeit 20 Jahre). Der Vergleich hinkt aufgrund der hohen Investitionskosten für das Pilotprojekt. Aber selbst bei zukünftigen Anlagen unter optimalen Bedingungen werden diese mit den aktuell zur Verfügung stehenden Solarzellen nicht rentabel zu betreiben sein. Dafür wären bei ähnlichen Standortbedingungen Zellen mit min. 300 Wp/$m^2$ notwendig. Momentan kommen die auf dem Markt verfügbaren Zellen noch nicht an diese Werte heran. Zudem ist zu erwarten, dass solche Zellen höhere Investitionskosten zur Folge hätten.
Anzustreben ist eine Rückspeisung inkl. Vergütung in das IWB-Netz. Allerdings sind die Erträge bei der aktuellen Vergütung von IWB von CHF -.14 / kWh nur sehr gering (beim Prototyp wären das knapp CHF 50.- pro Jahr).

### c. Weitere Wartehallentypen

Die BVB verwendet nur zwei grössere Standard-Wartehallentypen. Die Mono Combi und die Duplex plus. Die Mono Combi weist eine Dachfläche von 11.0 $m^2$, die Duplex plus eine von 14.4 $m^2$ auf. Bei der grössten Fläche der Duplex plus resultiert aber immer noch ein jährliches Betriebsergebnis von CHF -204.-.
Unter den vorliegenden Bedingungen müsste eine PV-Anlage mindestens eine Fläche von 70 $m^2$ aufweisen, um eine positive Bilanz zu erzielen (sofern der gesamte Strom selbst genutzt werden kann).
Das Gedankenspiel erweitert um eine optimierte Variante mit 25 Jahren Laufzeit, einer Performance Ratio von 80% und der Eigennutzung der Stromproduktion von 100%, hätte eine minimale Fläche von 20$m^2$ zur Folge. All dies unter der Voraussetzung, dass der Strompreis langfristig nicht unter CHF -.35 /kWh fällt.

### d. Umweltschutzgedanke

Bei einer Neuanlage mit einem jährlichen Defizit könnte man anführen, dass dafür $CO_2$-Emissionen reduziert werden können. Hier macht uns der aus 100% erneuerbarer Energie bestehende Strommix von IWB einen Strich durch die Rechnung. Gemäss Factsheet von IWB[2] dürfte dieser ungefähr bei 25 g$CO_2$/kWh liegen, was bereits unter dem Wert einer PV-Anlage liegt (ca. 50 g$Co_2$/kWh).

### e. Sicht auf weitere Schweizer Städte

Die Situation in anderen Schweizer Städten ist ähnlich. Die Werte bezüglich Globalstrahlung liegen für alle grösseren Städte in einem engen Streubereich und auch bezüglich der innenstädtischen Situation (Ausrichtung, Beschattung) können die Ergebnisse aus Basel auf andere Verkehrsbetriebe projiziert werden. Ebenfalls bezüglich der $CO_2$-Emissionen zeigt sich ein vergleichbares Bild. Alle grossen Schweizer Städte weisen bessere Werte in ihrem Strommix auf, als dass eine PV-Anlage zu deren Reduktion beitragen würde. Schlussendlich kann gesagt

werden, dass die Schlussfolgerungen und Empfehlung eine gewisse Allgemeingültigkeit für Städte wie Zürich, Genf, Lausanne, Bern, Winterthur, Luzern oder St. Gallen haben.

# 6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

## a. Schlussfolgerungen

- Eine Anlage in der vorliegenden Grösse und technischen Ausstattung direkt in die bestehende, angepasste Wartehallenkonstruktion zu integrieren, ist mit auf dem Markt vorhandenen Komponenten ohne Probleme machbar.
- Die spezifischen Bedingungen wie Lage, Ausrichtung und Neigung ergeben bescheidene Leistungswerte.
- Solche Anlagen sind derzeit nicht kostendeckend zu betreiben. Dazu wären deutlich leistungsfähigere Solarzellen notwendig, welche aktuell nicht oder noch nicht zur Verfügung stehen.
- Das Customizing ergibt sehr hohe Investitionskosten.
- Eine Reduktion von $CO_2$ ist nicht möglich, da der Strommix von IWB diesbezüglich bereits optimiert ist.

## b. Empfehlung

Von der Erstellung weiterer PV-Anlagen in Standard-Wartehallen der BVB ist abzusehen. Sie ergeben weder ökonomisch noch ökologisch Sinn.

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

a: Jahr
BVB: Basler Verkehrs-Betriebe
CHF: Schweizer Franken
$CO_2$: Kohlendioxid
IWB: Industrielle Werke Basel
kWh: Kilowattstunde
kWp: Kilowatt Peak
$m^2$: Quadratmeter
MWSt.: Mehrwertsteuer
PLC: Programmable Logic Controller
PR: Performance Ratio
PV: Photovoltaik
TVG: Teilvorgespanntes Glas
VSG: Verbundsicherheitsglas
Wh: Wattstunde
Wp: Watt Peak

# Literaturverzeichnis

[1] Website des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, www.meteoschweiz.ch, 20.10.2024

[2] Website der IWB, www.iwb.ch, 23.10.2024

# Anhang

- Fotodokumentation