

Umsetzbarkeit eines autarken solarbetriebenen HiFi-Lautsprechersystems

Antonio Arnold¹, Manuel Eberle¹, Thomas Stoppel¹, Frank Ellinger¹

¹TU Dresden, Chair for Circuit Design and Network Theory, Dresden, Germany
thomas.stoppel@tu-dresden.de, Ellinger, Frank <frank.ellinger@tu-dresden.de>

Kurzfassung

Batteriebetriebene Geräte bieten eine mobile Stromversorgung für kleine und mittelgroße Geräte. Während mikroelektronische Geräte Strom im mW-Bereich benötigen, nutzen Leistungsverstärker für Lautsprecher bis zu mehrere hundert Watt. Auch wenn sie für den kabellosen Einsatz konzipiert werden können, muss die Batterie dennoch irgendwann aufgeladen werden. Wir haben die Möglichkeit untersucht, einen HiFi-Lautsprecher unter Verwendung von monokristallinen Solarmodulen mit einer Batterie als Energiespeicher zu betreiben. Es wurde die Wirksamkeit der Solarmodule unter verschiedenen Randbedingungen im Innenbereich untersucht und bewertet. Der Leistungsbedarf der Schaltung beträgt ca. 2.31 W, was bei 10 Stunden Ladezeit unter optimalen Bedingungen einen zuverlässigen Betrieb von 1 Stunde ermöglicht.

Abstract

Battery powered devices provide mobile power supply for small and medium devices. While microelectronic devices need power in the mW range, power amplifiers for loudspeakers require up to several hundreds of Watts. Even though they can be designed for wireless use, loading the battery is still required at some point.

We investigated the possibility of operating a hi-fi speaker using monocrystalline solar modules with a battery as energy storage. The effectiveness of the solar modules was investigated and evaluated under various boundary conditions indoors. The circuit's power consumption is approximately 2.31 W, which allows for 1 hour of reliable operation with 10 hours of charging time under optimal conditions.

1 Hintergrund

Während mikroelektronische Geräte Strom im mW-Bereich benötigen, nutzen Leistungsverstärker für Lautsprecher bis zu mehreren hundert Watt. Im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung ist zu klären, ob heute kommerziell verfügbare Energie Harvesting-Methoden für einen dauerhaften Betrieb und in Kombination mit einer Batterie sinnvoll dafür einsetzbar sind. Es existieren kommerzielle Lösungen für batteriebetriebene Lautsprechersysteme, die über Solar-Paneele geladen werden können.

Der französische Hersteller PikiP bietet das Modell BOOTH an, das Frequenzen von 40 bis 20.000 Hz abdeckt und einen Schalldruckpegel von 102 dB bei 115 W erreicht. Mit einem Akkumulator von 2160 Wh kann es bis zu 45 Stunden ohne externe Energie betrieben werden; eine integrierte Photovoltaikanlage mit 320 W lädt den Energiespeicher in 6 Stunden auf.

Eine tragbare Alternative ist der Malibu von Urbanista, der Frequenzen von 20 bis 20.000 Hz abdeckt und 82 dB bei 10 W erreicht. Sein Akkumulator mit 13,32 Wh ermöglicht einen Betrieb von bis zu 20 Stunden. Die Photovoltaikeinheit arbeitet am effizientesten bei direkter Sonneneinstrahlung.

Die ATB 5 von WHD dient als Informationssystem. Sie hat einen Frequenzbereich von 400 bis 13.000 Hz und erreicht 97 dB bei 5 W Leistung, mit einer Laufzeit von bis zu 7 Stunden. Spezifikationen zur Photovoltaikanlage sind nicht frei verfügbar.

Um den maximalen Wirkungsgrad aus solarbetriebenen Systemen zu ziehen, sind diese idealerweise für die Nutzung im Freien konzipiert. Die Nutzung von Photovoltaik in Innenräumen ist stark vom genutzten Material (z. B. Silizium oder organische Halbleiter) und damit der Effizienz abhängig. Modelle wie der Malibu nutzen solche neuartigen Solarzellen, die auch unter künstlichem Licht funktionieren, jedoch ist die Ladeeffizienz in Innenräumen aufgrund der geringen Lichtintensitäten und des lichtquellenabhängigen optischen Spektrums limitiert.

Da räumliche Gegebenheiten wie Positionierung einen Einfluss auf die Klangqualität haben, soll untersucht werden, wie Ausrichtung und Abschattung die autarke Nutzung von autarken HiFi-Boxen beeinflussen. Zusätzlich soll die Systembetrachtung der elektronischen Komponenten Erkenntnisse für eine Optimierung eines solchen Systems liefern.

2 Materialien

Systementwurf

Die Wahl eines geeigneten Lautsprechers (elektromechanischer Wandler) mit gleichmäßigem Klangspektrum und passendem Verstärker für eine gute Klangqualität bei geringem Leistungsverbrauch bildet den Ausgangspunkt für die Gesamtbetrachtung des Systems.

Mit Blick auf die Entwicklung eines autarken Systems, wurden im Projekt weitere ingenieurtechnische Design-Aspekte betrachtet: Es wird Energy-Harvesting mit marktgängigen Solar-Modulen eingesetzt. Weiterhin sind Si-

cherheitsaspekte betrachtet worden, da der generelle Einsatz von Akkus größerer Kapazität bei falscher Handhabung (z. B. Überladung, thermische Überlastung) ein Sicherheitsrisiko darstellt. Dies wurde durch Verwendung eines LiFePO₄-Akkus und eines Maximum Power Point Tracking (MPPT)-Reglers (siehe nachfolgender Absatz) mit entsprechenden Sicherheitsschaltkreisen realisiert.

MPPT-Regler

Als Solarladeregler wird der BlueSolar MPPT 75/10 des Herstellers Victron Energy eingesetzt. Dieser Laderegler verwendet einen besonders schnellen MPPT-Algorithmus, der im Vergleich zu konventionellen Laderegler einen bis zu 10 % höheren Leistungsertrag ermöglichen kann. Weiterhin verfügt dieses Modell über integrierte Schutzfunktionen, die zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Lautsprecherbox beitragen. Der Laderegler erfüllt die Normen EN/IEC 62109-1, UL 1741 und CSA C22.2.

Hi-Fi Lautsprecher

Zur effizienten Nutzung der verfügbaren Energie wird der Visaton B 200 Breitbandlautsprecher genutzt. Mit einem Schalldruckpegel von 96 dB (2,83 V/1 m) und einem Frequenzbereich von 40 Hz bis 18.000 Hz ermöglicht er eine energieeffiziente und akustisch hochwertige Klangwiedergabe.

Batterie

Die Energiespeicherung erfolgt über einen LiFePO₄-Akkumulator mit 128 Wh. Ein integriertes Batteriemangementssystem sorgt für einen sicheren Betrieb, indem es den Akku vor normrelevanten Fehlzuständen schützt, u.a.:

- Kurzschluss
- Überladen
- Tiefentladung
- Überlastung (z. B. thermisch).

Zusätzlich ist die verwendete LiFePO₄-Zellchemie weniger anfällig gegen thermisches Durchgehen als Li-Ionen-Technologie.

Solar-Panele

Zur Deckung des Energiebedarfs wurden zwei monokristalline Solarzellen des Typs Sun Plus 10 S des Herstellers Phaesun eingesetzt. Die Module verfügen über eine Nennleistung von je 10 W.

Verschaltung

Das autarke Lautsprechersystem wurde zur Konzeptionierung in drei Teilsysteme untergliedert: die Photovoltaik, den Energiespeicher und die Verbraucher. Die Verschaltung dieser Teilsystemen mit den jeweiligen Komponenten ist in Bild 1 dargestellt.

Die Photovoltaikeinheit umfasst zwei monokristalline Solarmodule sowie den verwendeten MPPT-Laderegler. Die Solarmodule werden in Reihenschaltung betrieben, da der Laderegler eine Eingangsspannung fordert, die mindestens 5 V über der Batteriespannung liegt.

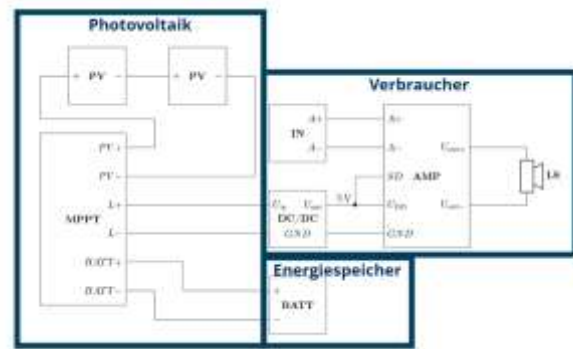


Bild 1 Verschaltung der autarken Lautsprecherbox

Am Laderegler sind Anschlüsse für den Energiespeicher sowie ein Lastausgang vorgesehen. Der ausgewählte Energiespeicher kann direkt an den Ausgang des Ladereglers angeschlossen werden.

Der Lautsprecher wird über einen Audioverstärker sowohl mit dem Audiosignal als auch mit der erforderlichen elektrischen Leistung versorgt. Zwischen Audioverstärker und Lastausgang des MPPT-Ladereglers ist ein DC/DC-Wandler erforderlich, um die Spannung von 12 V auf 5 V zu reduzieren.

3 Messungen

3.1 Messaufbau und Messort

Es wurden Messreihen durchgeführt, um die Leistungserzeugung der monokristallinen Solarmodule unter Innenraumbedingungen bewerten zu können.



Bild 2 Gemessene Leistung der Solarmodule im Innenraum in Abhängigkeit von der Ausrichtung

In Bild 2 ist die erzeugte Leistung in Abhängigkeit der Ausrichtung der Fensterfront des Lautsprecher-Raumes abgebildet. Alle Messungen erfolgten bei geschlossenen Fenstern auf dem Fensterbrett. Die Leistung ist bei süd- und westseitiger Ausrichtung vergleichbar hoch. Zudem zeigte sich, dass die Leistung mit zunehmender Bewölkung abnimmt. Wie erwartet, wird bei nördlicher Ausrichtung eine geringere Leistung erzielt. Auffällig ist jedoch, dass auf der Nordseite unter bewölkten Bedingungen eine höhere Leistung gemessen wird als bei sonnigen Bedingungen. Dies lässt sich durch Reflexionen des Sonnenlichts an den Wolken erklären, wodurch ein größerer Anteil diffusen

und reflektierten Lichts vom Solarmodul absorbiert werden kann.

3.2 Einfluss Verschattung

Weiterhin wurde der Einfluss von Verschattungen auf die Leistungsabgabe der monokristallinen Solarmodule untersucht. Zunächst wurden gezielt einzelne Zellreihen des Solarmoduls abgedeckt.

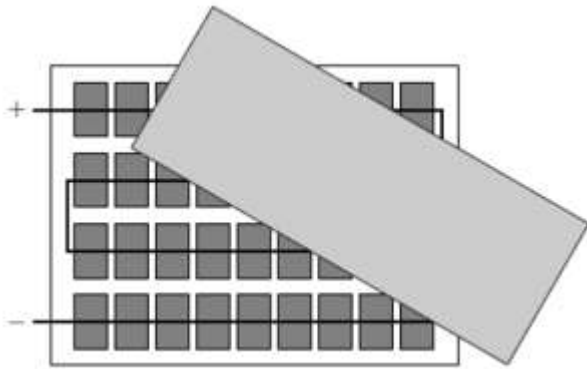


Bild 4 Unregelmäßige Verschattung des Solarmoduls

Bei der gezielten Verschattung einzelner Modulreihen von zwei parallel betriebenen Paneelen bleibt das Leistungsverhältnis nahezu konstant. Im Durchschnitt wird bei gezielter Verschattung (eine Reihe, zwei Reihen oder ein ganzes Modul) im Durchschnitt 37,60 % der Leistung ohne Verschattung erreicht. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der verschatteten Fläche und dem Leistungsverhältnis lässt sich somit nicht erkennen.

Auch der Einfluss unregelmäßiger Verschattungen wurde untersucht. Diese sind schematisch in Bild 4 für die Fläche eines halben Panels abgebildet. Dabei werden auch diagonale Bereiche abgedeckt.

Die unregelmäßige Verschattung von einem halben Panel (entspricht der Fläche von zwei Reihen), in Reihenschaltung, führt zu einem deutlich geringeren Leistungsverhältnis von durchschnittlich 3,16 %. In der Reihenschaltung wirkt sich ein Abfallen des Stroms wesentlich stärker limitierend auf die Leistung des unverschatteten zweiten Moduls aus als der Spannungsabfall in der Parallelschaltung.

3.3 Einfluss Wetterbedingungen



Bild 5 Leistung in Abhängigkeit der Wetterbedingungen für zwei Solarmodule im Innenbereich

Bild 5 zeigt die erzeugte Leistung in Abhängigkeit der Wetterbedingungen. Sämtliche Messungen wurden bei südlicher oder westlicher Ausrichtung des Solarmoduls durchgeführt. Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit: Mit zunehmender Bewölkung nimmt die Leistung der Solarmodule ab. Dieses Verhalten tritt sowohl bei geöffneten als auch geschlossenen Fenstern auf. Unter sonnigen Bedingungen und geöffneten Fenstern wird eine maximale Leistung zwischen 9,294 W und maximal 13,103 W bei zwei in Reihe geschalteten Solarmodulen erreicht.

4 Evaluierung Autarkes HiFi-System

Die entwickelte Lautsprecherbox (Bild 6) stellt im aktuellen Stand der Technik eine einzigartige Lösung dar, die keine vergleichbaren Produkte auf dem Markt hat.

Die Anforderung nach einem Schalldruckpegel (SPL) von mindestens 95 dB wurde nahezu erreicht, was die Effektivität der Lautsprecherbox unterstreicht.

Dennoch sind die vorgestellte Lautsprecherbox sowie die untersuchte kommerziell verfügbare Hardware nur eingeschränkt für den Einsatz im Innenraum geeignet. Zukünftige Fortschritte im Bereich der Materialforschung (organischen Photovoltaik - OPV, der Farbstoffsolarzellen - DSSC) mit größerer Effizienz würde zusätzliche Vorteile durch die Verwendung von Indoor-Spektren erlauben und damit eine kombinierte Verwendung ermöglichen, was zu einer verbesserten und zuverlässigeren Energieversorgung führt.

Der ermittelte Leistungsbedarf der Schaltung im Betrieb beträgt ca. 2,31 W, sodass bei einstündiger Nutzungsdauer des Systems bei einer Mindestladezeit von 10 h (durchschnittlich 700 mW Ladeleistung abzüglich Verluste durch Regler und Batterie) unter günstigen Wetterbedingungen ein zuverlässiger Betrieb erfolgen kann.



Bild 6 Lautsprecherboxsystem

5 Ausblick

Anhand der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen wird erkennbar, dass zwei Modifikationen der ursprünglichen Schaltung erforderlich sind: Zum einen sollten bei einer Reihenschaltung der Solarmodule Bypass-Dioden integriert werden, um Leistungsverluste infolge von Verschattungen zu reduzieren. Zum anderen zeigt die gesamtenergetische Betrachtung, dass beim MPPT-Laderegler Optimierungsbedarf besteht.

Für den Einsatz in diesem System fällt eine hohe Verlustleistung von 300 mW an diesem an. Durch eine Schaltung zur Unterbrechung des Energieverbrauchs des Reglers bei Nichtnutzung der Ladefunktion kann der Standby-Energieverbrauch stark reduziert werden (Bild 7). Die Dimensionierung für kleine Leistungen birgt zudem Potential für eine Miniaturisierung.

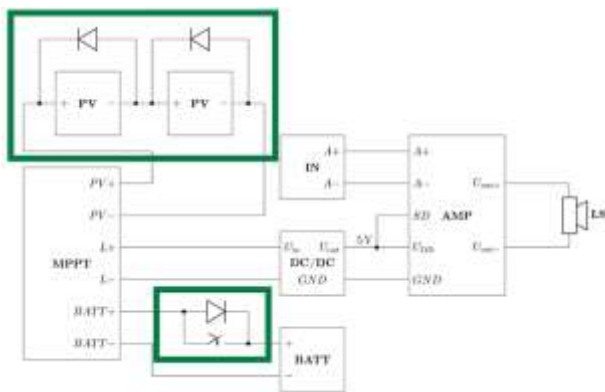


Bild 7 Anpassungen der Schaltung

Die Verwendung amorpher Solarzellen zur Deckung des Energiebedarfs unter künstlicher Beleuchtung (Typs AM-8801 von Panasonic) wurde theoretisch betrachtet. Diese Module verfügen über eine Nennleistung von 196 mW. Aufgrund der amorphen Zelltechnologie ist unter künstlicher Beleuchtung ein höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu monokristallinen Solarzellen zu erwarten.

Eine erste Recherche zeigt, dass eine höhere Leistungsklasse aktuell nicht verfügbar ist. Eine Skalierbarkeit mit mehreren Einzelzellen ist aufgrund des hohen Preises derzeit vergleichsweise nicht rentabel.

Mit zunehmender Distanz nimmt der Anteil des direkt durch das Fenster einfallenden und vom Solarmodul absorbierten Lichts, und damit die Leistung, ab. In einer ersten Messung zeigte, dass sich auch der Einfluss eines geöffneten Fensters mit zunehmender Entfernung in ähnlicher Weise verringert. Dies sollte in weiteren Experimenten untersucht werden.

Weiterhin kann ein drahtloser Datenempfänger in die Lautsprecherbox integriert werden, um eine flexible und benutzerfreundliche Steuerung zu gewährleisten. Der Energiebedarf muss hierbei berücksichtigt werden. Low-Power Empfänger sind für einen minimalen Standby-Strom prädestiniert.

Diese Konnektivität ist ebenso für den Aufbau einer zweiten Lautsprecherbox zur Erstellung eines kabellosen autarken Stereo-Paares relevant. Neben der energetischen Optimierung ist das System erst dann für die sinnvolle Anwendung im HiFi-Bereich (Stereo-Signale) relevant.

6 Danksagung

Beim DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) Exzellenzcluster „Responsible Electronics in the Climate Change Era – REC2“ (EXC 3035, Projekt-ID 533607596) bedanken wir uns für den Wissensaustausch bzgl. Energie-Harvesting. Das Projekt „EKI-Saxony“ (100734135) wird mit Mitteln der Europäischen Union kofinanziert und durch Steuermittel auf Grundlage des vom Sächsischen Landtags beschlossenen Haushaltes mitfinanziert.

7 Literatur

- [1] Adolf Goetzberger und Volker U. Hoffmann. Photovoltaic Solar Energy Generation (Springer Series in Optical Sciences). Springer, 2005, S. 232. isbn: 9783540236764.
- [2] Guangyu Wang. Technology, manufacturing and grid connection of photovoltaic solar cells. Hoboken, NJ, [Beijing], 2018.
- [3] Fadliondi Fadliondi, Haris Isyanto und Budiyanto Budiyanto. „Bypass Diodes for Improving Solar Panel Performance“. In: International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) 8.5 (Okt. 2018), S. 2703. issn: 2088-8708. doi: 10.11591/ijece.v8i5.pp2703-2708.
- [4] Visaton. Visaton B 200. 2023. url: https://www.visaton.de/sites/default/files/dd_product/B%20200_1350.pdf (besucht am 10. 06. 2025).
- [5] Diodes Incorporated. Diodes Incorporated PAM8302A. 2021. url: <https://www.diodes.com/datasheet/download/PAM8302A.pdf> (besucht am 10. 06. 2025).
- [6] Michael Safoutin u. a. „Effect of Current and SOC on Round-Trip Energy Efficiency of a Lithium-Iron Phosphate (LiFePO4) Battery Pack“. In: Bd. 2015. Apr. 2015. doi: 10.4271/2015-01-1186.
- [7] Victron Energy. Victron Energy BlueSolar MPPT75/10. url: https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-Blue-Solar-Charge-Controller-MPPT-75-10,-75-15,-100-15,-100-20_48V-DE.pdf (besucht am 10. 06. 2025).
- [8] MEAN WELL. MEAN WELL N78 Series. 2024. url: <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=N78> (besucht am 10. 06. 2025).