

# Zur Bedeutung einer Steuerung von mikrobiellen Brennstoffzellen – Optimierung von Stromernte und -speicherung

Ulrich Kunz

Technische Universität Clausthal

Institut für Chemische und Elektrochemische Verfahrenstechnik

Leibnizstraße 17

38678 Clausthal-Zellerfeld

und

Energie-Forschungszentrum Niedersachsen

Am Stollen 19A

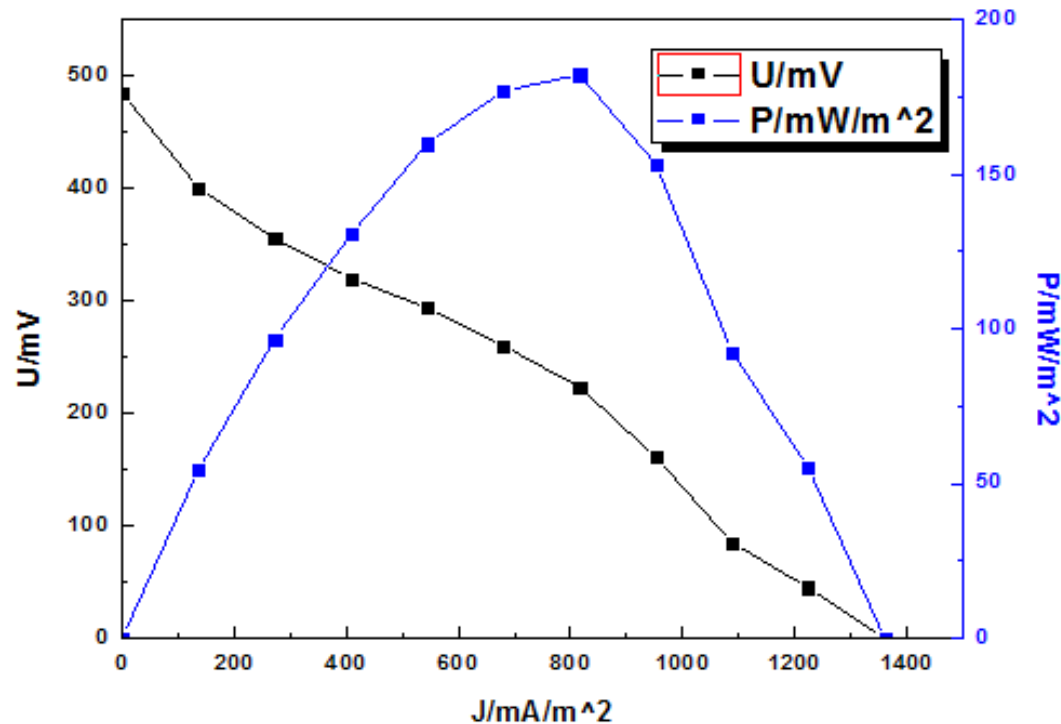
38640 Goslar

# Zur Bedeutung einer Steuerung von mikrobiellen Brennstoffzellen – Optimierung von Stromernte und -speicherung

## Inhalt:

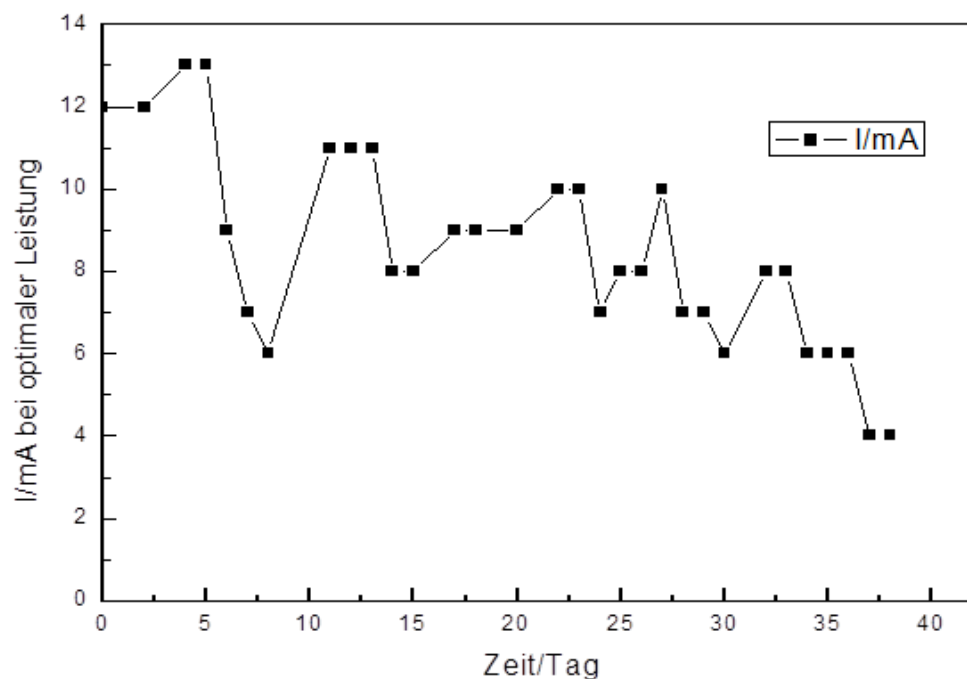
- Elektrische Charakteristika mikrobieller Brennstoffzellen (MBZ)
- Möglichkeiten zur Beeinflussung der Leistungsentwicklung von MBZ
- Vor- und Nachteile verschiedener Konzepte zur Energieauskopplung aus MBZ
- Spannungswandler zur Anpassung der niedrigen Spannungen von MBZ an technisch interessante Spannungen
- Zusammenfassung und Ausblick

# Gemessene Kennlinie einer mikrobiellen Brennstoffzelle



- ➔ Spannungen bei relevanten Strombelastung liegen bei 200-300 mV.
- ➔ Leistung pro Quadratmeter liegt günstigstenfalls bei 150 – 200mW.

# Zeitlicher Verlauf der maximalen Leistungsentwicklung einer MBZ

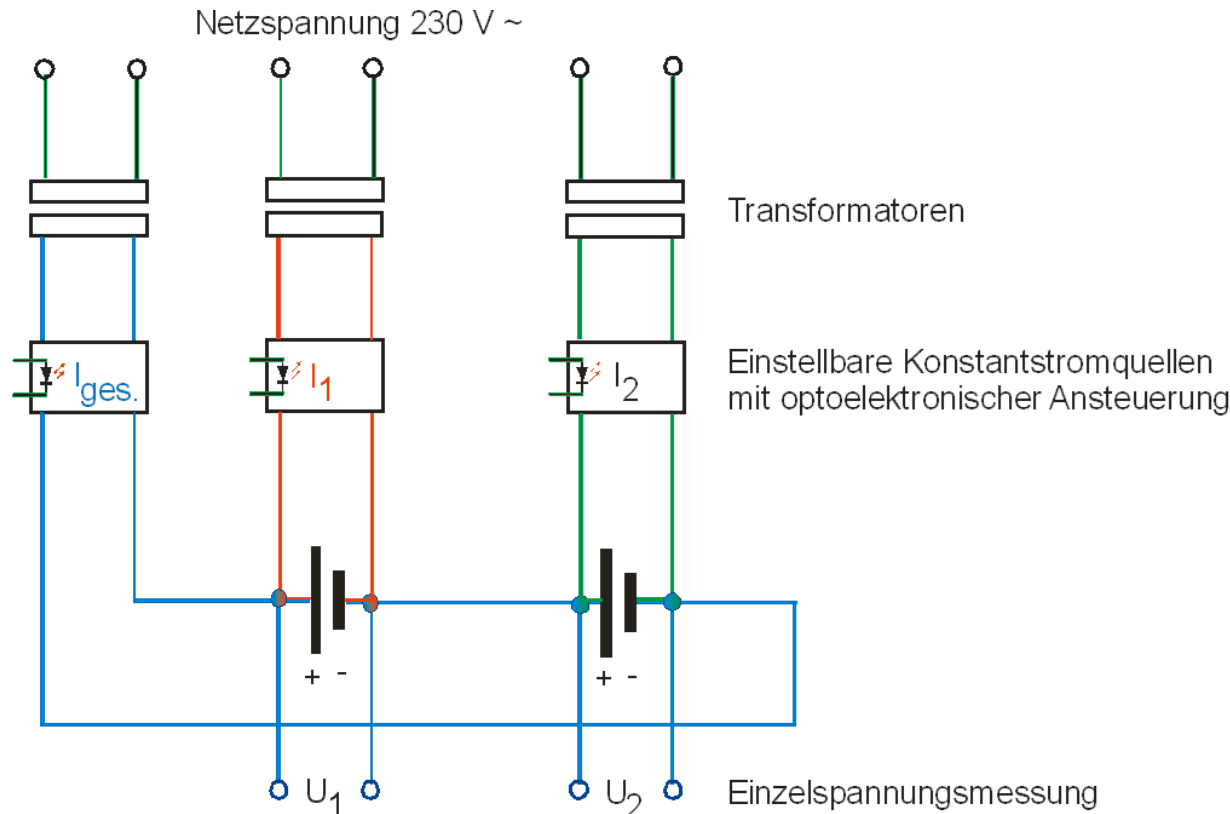


- ➔ Leistung ändert sich nicht vorhersehbar.
- ➔ Änderungen sind groß (mehr als 50%).

# Konzept zum automatisierten Einstellen der maximal verfügbaren Leistung einer MBZ

- Aus der Literatur bekannt: Belastung der MBZ mit einem Widerstand, der den Strom fließen lässt, den die MBZ im Leistungsoptimum der Kennlinie liefern kann, führt zu einer schnelleren Entwicklung der erreichbaren Leistung als Belastung mit einem festen Widerstandswert.  
Lit: z.B. Premier, Kim et al.: Journal of Power Sources 196 (2011), 2013-2019
- Nachteile des Literaturkonzeptes:
  - Einstellung erfolgte durch variablen Widerstand in festen Schrittweiten
  - Verwendete Widerstände sind zu hoch für technisch relevante MBZ-Größen, werden nicht in niedrigeren Widerstandswerten, wie für größere MBZ benötigt, hergestellt.
- Verbesserung dieses Konzeptes möglich:
  - Ersatz der nur in Stufen variablen Widerstandslast durch kontinuierlich einstellbare Stromquelle.
  - Automatisierung des Einstellvorganges.
    - ➔ Genauere und selbständige Einstellung der optimalen Belastung auch bei höheren Strömen.
    - ➔ Schnelles Erreichen der vollen Leistung einer MBZ.

# Konzept zur schnellen Leistungsentwicklung einer MBZ

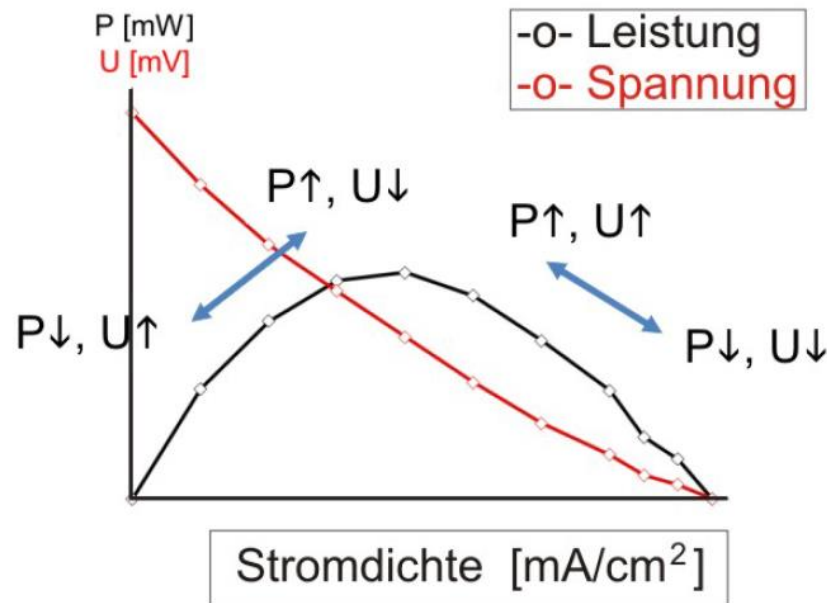


- ➔ Konstantstromquellen steuern jede Zelle individuelle an.
- ➔ Gleichzeitig werden die Zellspannungen gemessen.





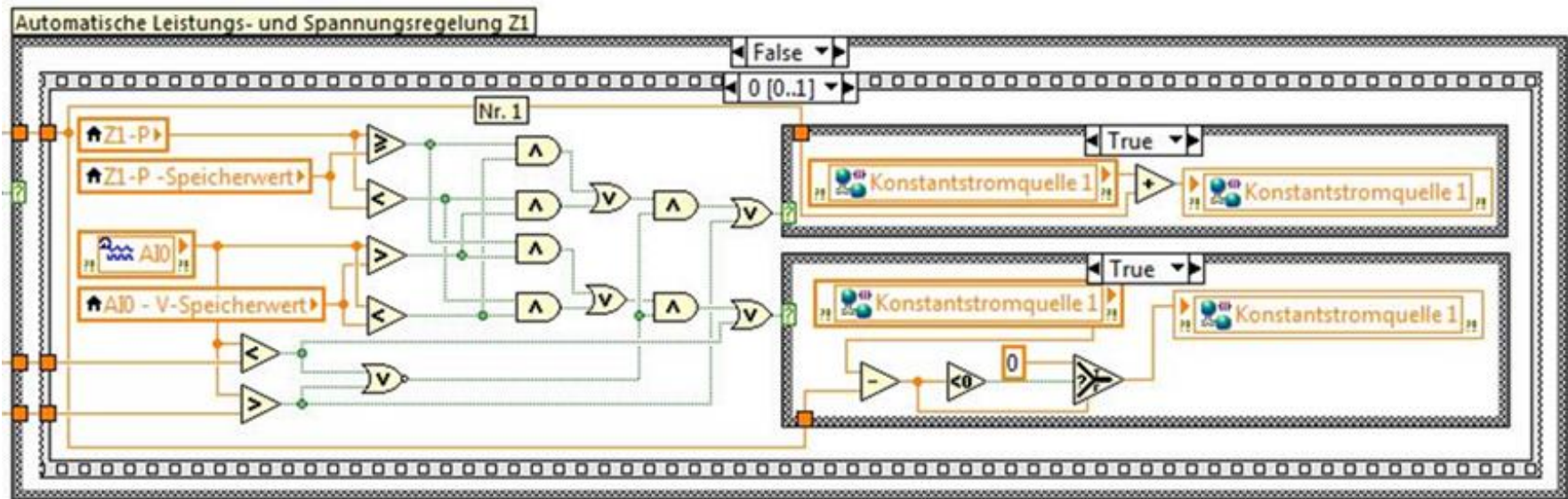
# Konzept zum automatisierten Einstellen der maximal Verfügbaren Leistung einer MBZ



- ➔ Prozesssteuerung unter LabView ermittelt den Punkt maximaler Leistung und belastet MBZ damit.
- ➔ Kontinuierliche Leistungsentwicklung der MBZ erreicht.



# Regelungsschema zur Einstellen der maximal verfügbaren Leistung einer MBZ

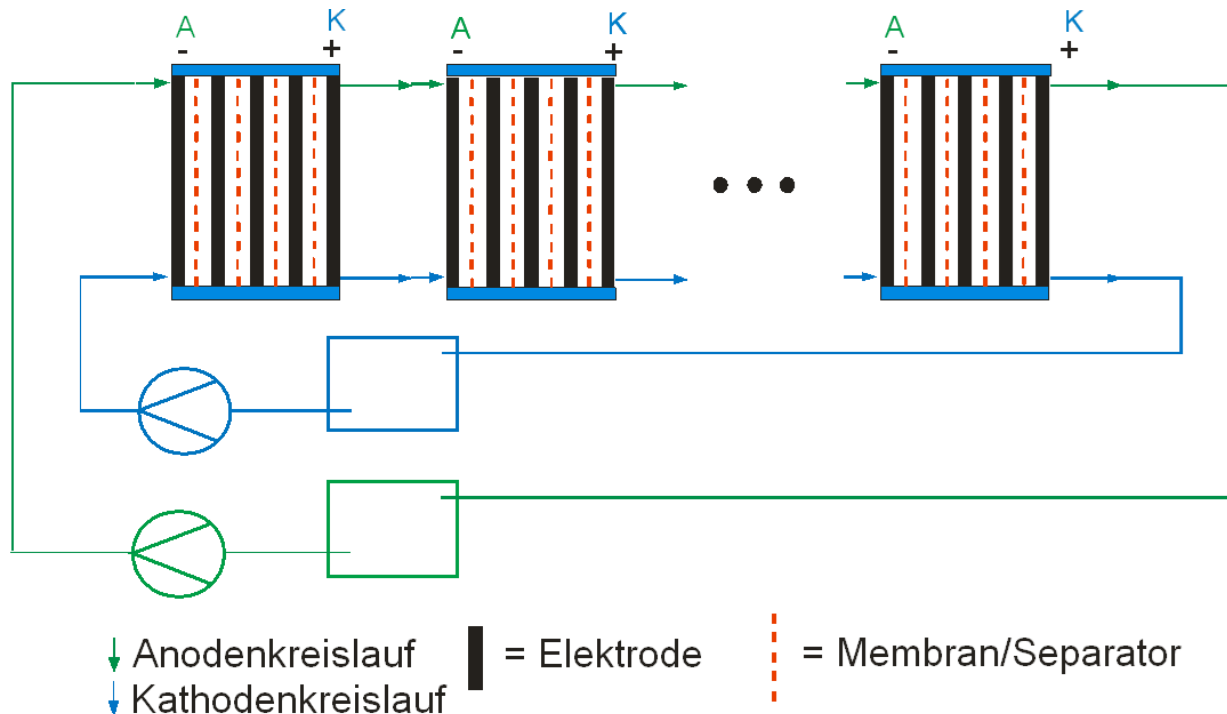


- ➔ Prozesssteuerung unter LabView ermittelt den Punkt maximaler Leistung und belastet MBZ damit.
- ➔ Kontinuierliche Leistungsentwicklung der MBZ erreicht.





# Ursprüngliches Konzept zur Energieausschleusung



- ➔ Bau von Stacks aus wenigen Zellen um technisch übliche Gerätespannungen zu erreichen ist nicht zielführend.
- ➔ Schwächste Zelle im Stack würde Stack-Gesamtleistung begrenzen.
- ➔ Bei höherer Strombelastung Spannungsumkehr der schwächsten Zelle mit Sterben der Mikroorganismen auf der Anode.



# DC/DC-Spannungswandler für eine MBZ

## Probleme:

- Serienschaltung von mehreren Bio-BZ, wie bei anorganischen Brennstoffzellen üblich, ist nicht geeignet, da es sich um lebende Systeme handelt, die ihre Leistung mit der Zeit in jeder Zelle individuell ändern. Bei Serienschaltung würde immer die schwächste Zelle die Gesamtleistung eines Stacks vorgeben.
- Übliche Halbleiter brauchen in Standardschaltungen mindesten 0,5V – 0,7 V als Anlaufspannung.

Anforderungen (Leistungsmaximum der bisher besten Zellen liegt bei etwas über 200mV):

- Soll aus Eingangsspannungen von ca. 200mV – 500mV technisch übliche Gerätebetriebsspannungen von ca. 1,5V – 5V erzeugen.
- Schaltung soll bei geringen Spannungen anlaufen.
- Ausgangsspannung sollte auf konstanten Wert geregelt sein.
- Wirkungsgrad sollte möglichst hoch sein.
- Schaltungsaufwand sollte gering sein.

## Stand der Technik:

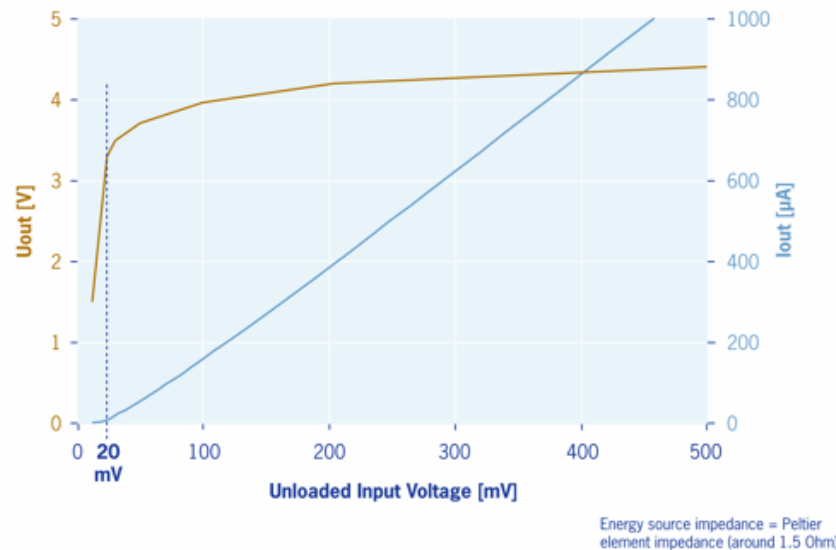
- Spannungswandler für so geringe Eingangsspannungen werden selten gebraucht.
- Eine industrielle realisierte Anwendung sind Wandler zur Überwachung von Gasfeuerungen, dabei wird aus der geringen Spannung einer Serienschaltung vieler Thermoelemente eine Betriebsspannung für eine elektronische Überwachungsschaltung gewonnen.
- Es gibt nach Stand der Literatur nur wenige Hersteller kommerzieller Schaltungen (Linear Technology, Enocean, Seiko).
- Leistung liegt im  $\mu\text{W}$  bis mW Bereich.



# Stand der Technik von DC/DC-Spannungswandlern für geringe Eingangsspannungen: Kommerzielle Lösungen

Beispiel des Herstellers EnOcean (<https://www.enocean.com/en/home/>)

Output of ECT310 versus Input



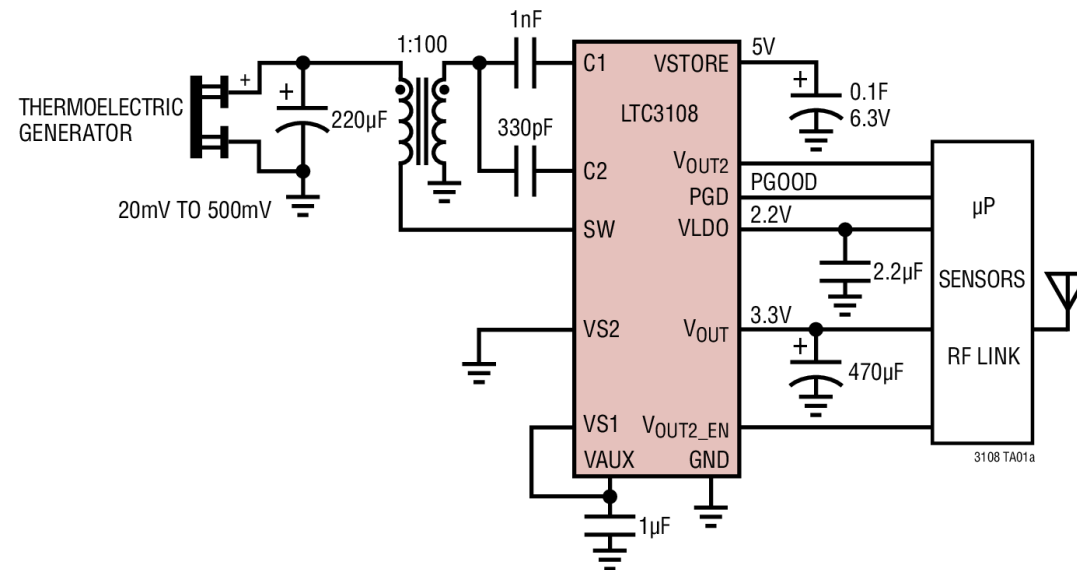
- ➔ Ausgangsströme im Bereich einiger 100  $\mu A$ .
- ➔ Als hoher Wirkungsgrad werden 30% angegeben.
- ➔ Zu geringe Leistung für mikrobielle Brennstoffzellen Anwendungen.



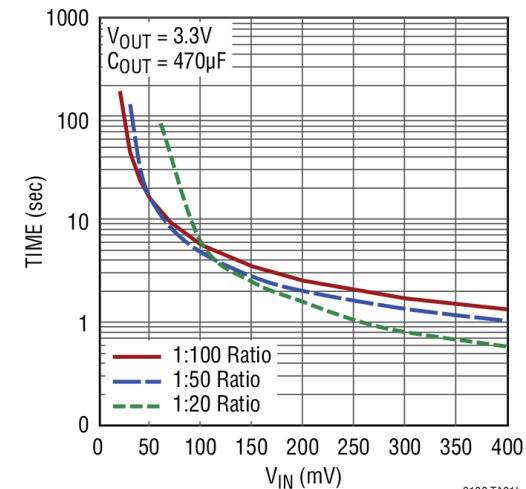
# Stand der Technik von DC/DC-Spannungswandlern für geringe Eingangsspannungen: Kommerzielle Lösungen

Beispiel des Herstellers Linear Technology (<http://www.linear.com/product/LTC3108>)

## Wireless Remote Sensor Application Powered From a Peltier Cell



## V<sub>OUT</sub> Charge Time



3108 TA01b

- ➔ Schaltung wurde von uns getestet.
- ➔ Ladezeit für einen Kondensator von 470μF liegt im Sekundenbereich.
- ➔ Zu geringe Leistung für mikrobielle Brennstoffzellen Anwendungen.



# Stand der Technik von DC/DC-Spannungswandlern für geringe Eingangsspannungen: Wissenschaftliche Literatur

Technische Daten von Schaltungsentwicklungen:

- Anlaufspannungen liegen bei ca. 50mV – 500mV.
- Leistungen liegen im Bereich einiger  $\mu$ W bis einiger mW.
- Als Wandlerkonzepte werden meist selbstschwingende Schaltungen verwendet.
- Ausgangsspannungen liegen im Bereich von 1,8V – 5V.
- Schaltungen mit paralleler Kondensatoraufladung und serieller Entladung brauchen eine große Anzahl von Relais mit zusätzlichem Stromverbrauch.

Literaturbeispiele:

/1/ N. Degrenne et al.: HAL Id: hal-00638164 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00638164>

/2/ P.K. Wu et al., Process Biochemistry, Volume 47, Issue 11, November 2012, Pages 1620–1626

/3/ J.M. Damaschke, 0-7803-3044-7/96\$5.00c1996 IEEE

/4/ <http://www.dicks-website.eu/fetosc/enindex.htm>

/5/ J. E. Bohan, US Patent 4734658 (1988)

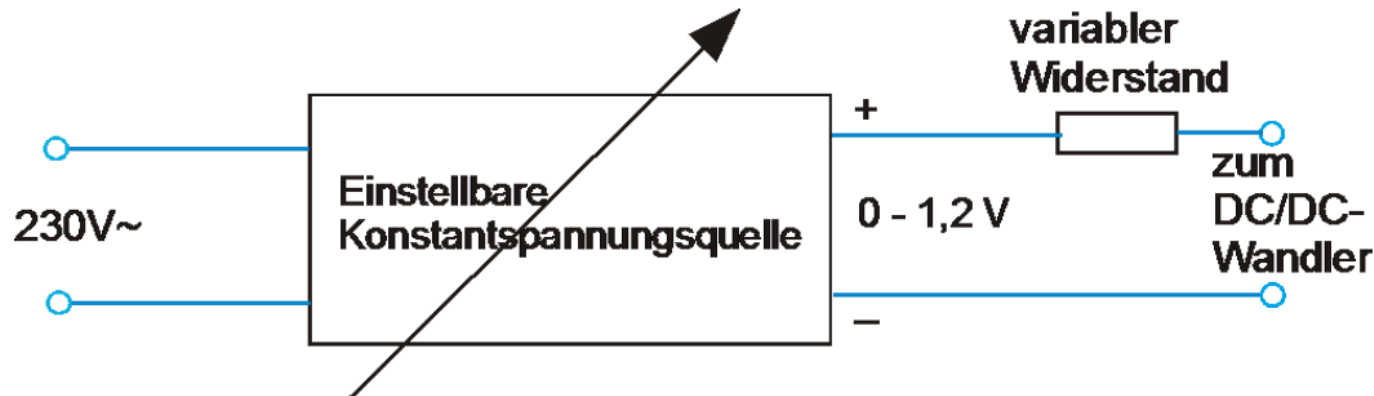
/6/ ). Woias et al., Journal of Physics: Conference Series 476 (2013) 012081 doi:10.1088/1742-6596/476/1/012081

/7/ Y. Kim et al., Energy Environ. Sci., (2011), 4, 4662

➔ Eigene Entwicklungsarbeiten notwendig.

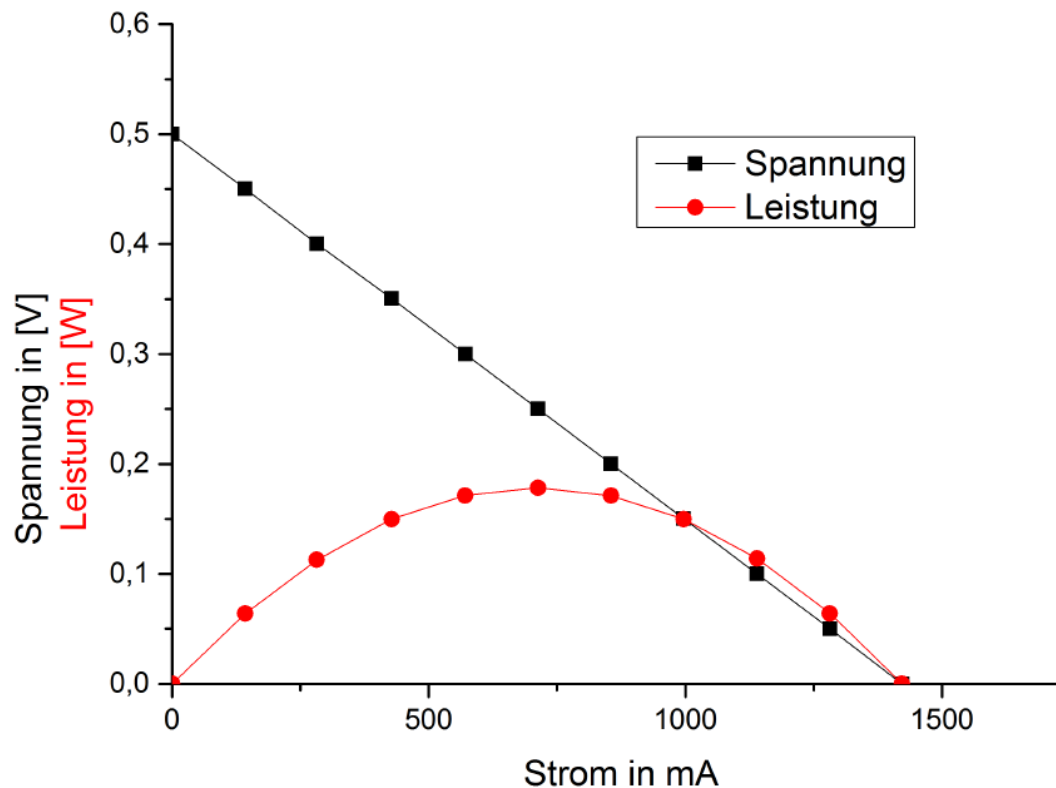


# Entwicklung von DC/DC-Spannungswandlern erfordert eine Simulationsschaltung, die eine MBZ nachstellen kann



- ➔ Schaltungsentwicklung mit echter MBZ ist nicht zielführend.
- ➔ Echte MBZ kann nicht auf gewünschte Parameter beliebig eingestellt werden.
- ➔ Simulationsschaltung muss Einstellung variabler niedriger Spannungen ermöglichen ( ca. 0 – 1,2 V).
- ➔ Simulationsschaltung muss Innenwiderstand der MBZ einstellbar nachstellen können ( ca. 0 – 1 Ohm).

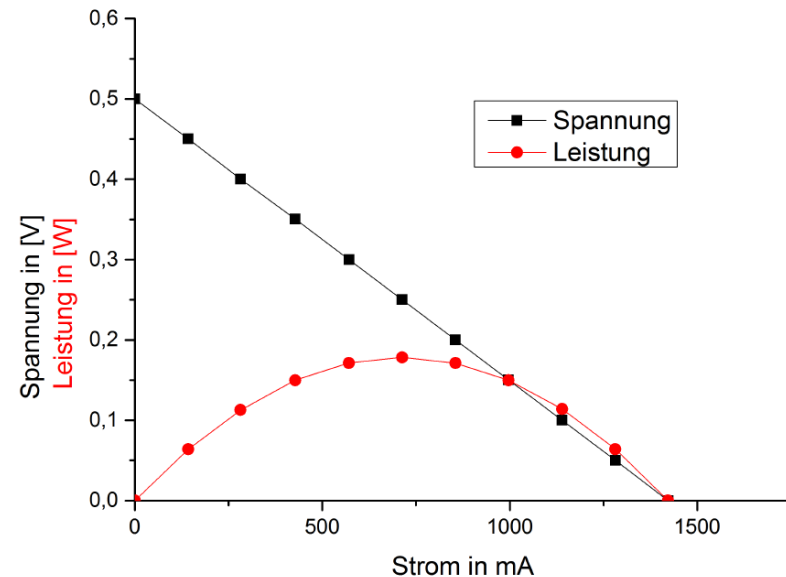
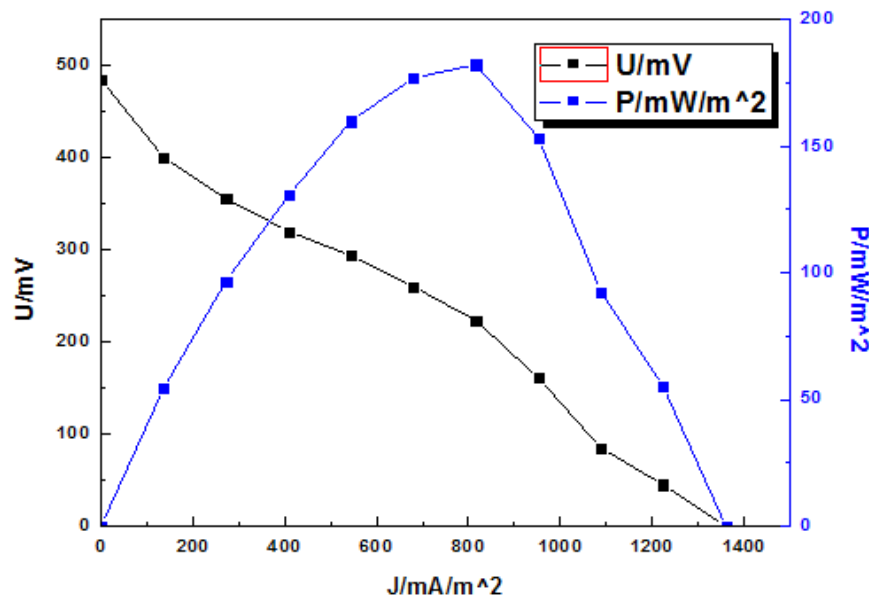
## Gemessene Kennlinie einer MBZ-Simulationsschaltung



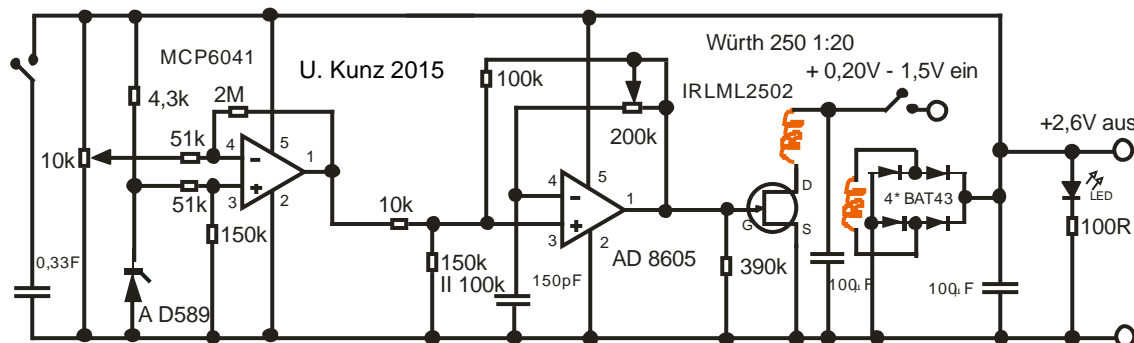
- ➔ Kennlinie entspricht der einer mikrobiellen Brennstoffzelle.
- ➔ Voraussetzung für Entwicklung und Test eigener Schaltungen erfüllt.



## Vergleich der Kennlinie einer MBZ mit der Simulation



➔ Kennlinien sind vergleichbar und bei der Simulationsschaltung beliebig einstellbar.





# Spannungswandler für eine MBZ

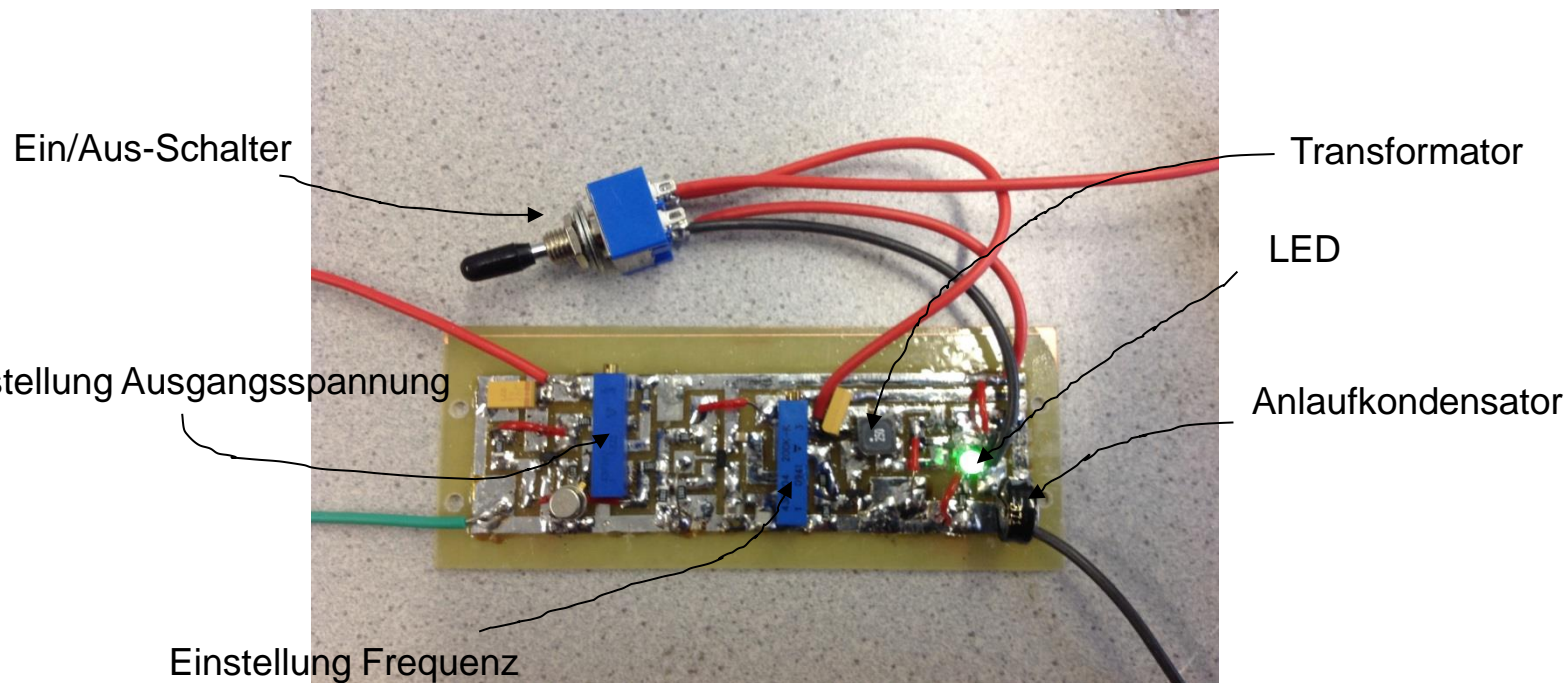
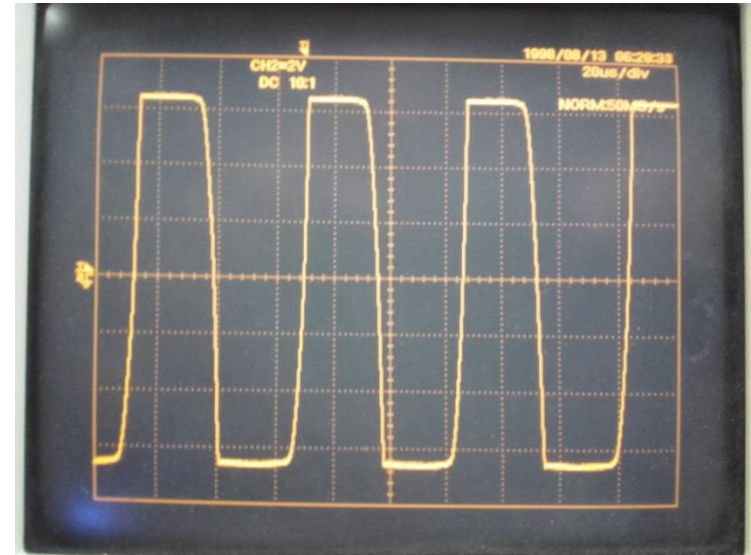
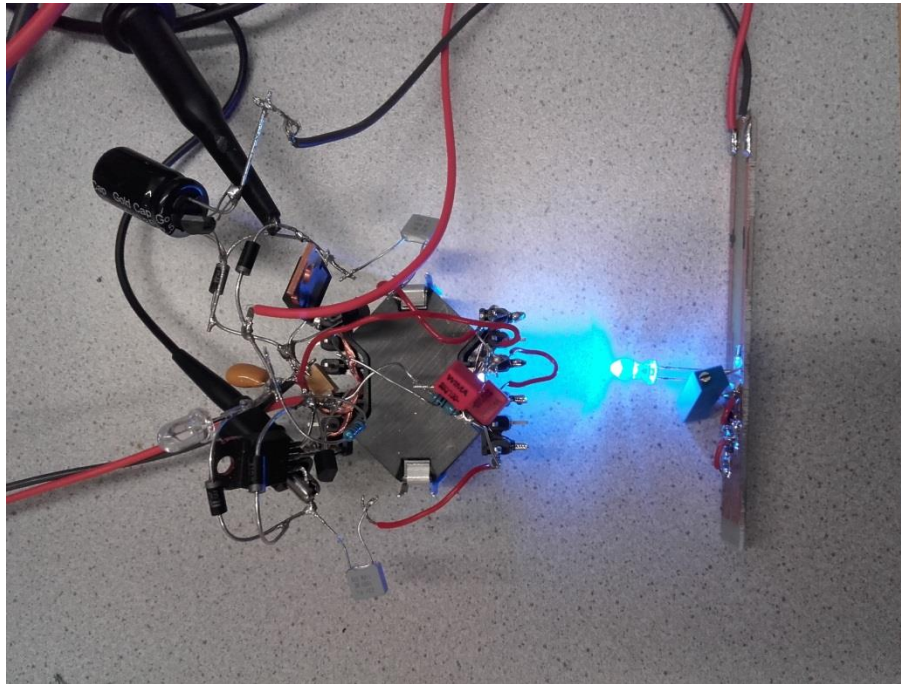


Photo des Entwicklungsmusters, Eingangsspannung 250mV, Ausgangsspannung 2,5V Last ist eine LED, Wirkungsgrad bei ca. 20%.



# Verbessertes Muster eines DC/DC-Wandler für eine MBZ



Vorläufiger Probeaufbau

Verbesserungen gegenüber dem ersten Muster:

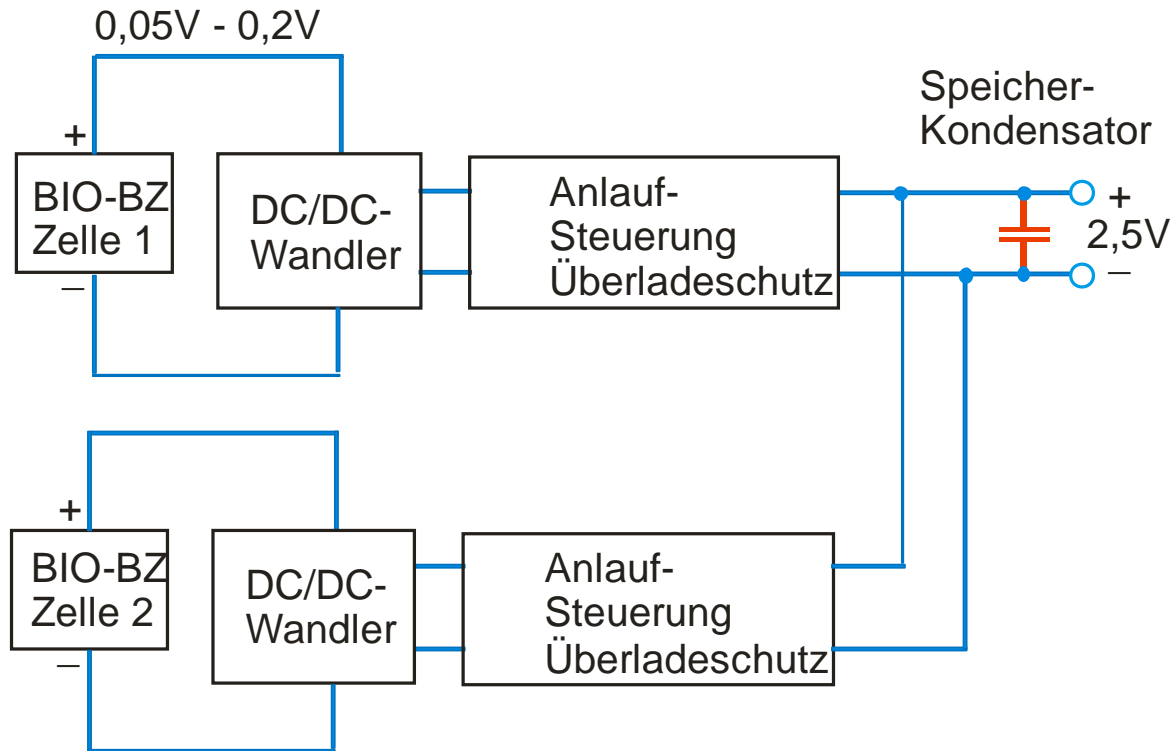
- ➔ Läuft ohne Hilfsenergie an.
- ➔ Läuft unter Volllast an.
- ➔ Wirkungsgrad von 20% auf 50% gesteigert.
- ➔ Übertragung höherer Leistung möglich.

## Betriebsdaten Muster DC/DC-Wandler für eine MBZ

Eingangs-Spannung V	Eingangs-Strom mA	Eingangs-Leistung mW	Ausgangs-Spannung V	Ausgangs-Strom mA	Ausgangs-Leistung mW	Wirkungsgrad %	Laststrom-einstellung mA	Koppel-kondensator nF
0,10	990	99,00	5,24	8,16	42,76	43,19	10	22
0,15	1510	226,50	10,27	10,01	102,80	45,39	10	22
0,20	2190	438,00	16,88	10,17	171,67	39,19	10	22
0,25	3010	752,50	23,46	10,37	243,28	32,33	10	22
0,10	1010	101,00	4,85	8,90	43,17	42,74	15	22
0,15	1780	267,00	7,03	14,90	104,75	39,23	15	22
0,20	2160	432,00	12,90	15,30	197,37	45,69	15	22
0,10	1130	113,00	5,00	10,00	50,00	44,25	15	220
0,15	1810	271,50	8,08	15,17	122,57	45,15	15	220
0,20	2240	448,00	14,30	15,36	219,65	49,03	15	220
0,10	1520	152,00	5,10	10,60	54,06	35,57	15	2200
0,15	2230	334,50	8,60	15,18	130,55	39,03	15	2200
0,20	2520	504,00	14,80	15,37	227,48	45,13	15	2200
0,10	1060	106,00	4,60	8,98	41,31	38,97	20	22
0,15	1990	298,50	5,58	16,76	93,52	31,33	20	22
0,20	2560	512,00	9,59	20,01	191,90	37,48	20	22

- ➔ Wandler kann Leistungen von 50mW – 200mW übertragen.
- ➔ Wirkungsgrad 30% - 50%.
- ➔ Wandler läuft unter Volllast an (deshalb etwas kleinerer Wirkungsgrad).
- ➔ Wandler startet zuverlässig ab 50mV Eingangsspannung auch unter Volllast.
- ➔ Überladeschutz für den Speicherkondensator realisiert.

# Konzept zur Energieausschleusung aus einer MBZ



Spannungsumkehr der schwächsten Zelle in einem seriellen Stack muss vermieden werden:

- ➔ Jede Zelle erhält einen eigenen DC/DC-Wandler.
- ➔ Alle Zellen speisen ihren jeweiligen Teilstrom in einen gemeinsamen Speicherkondensator.
- ➔ Anlauf der Wandler muss selbständig ohne Hilfsenergie erfolgen.



# Konzept zur Energieausschleusung aus einer MBZ

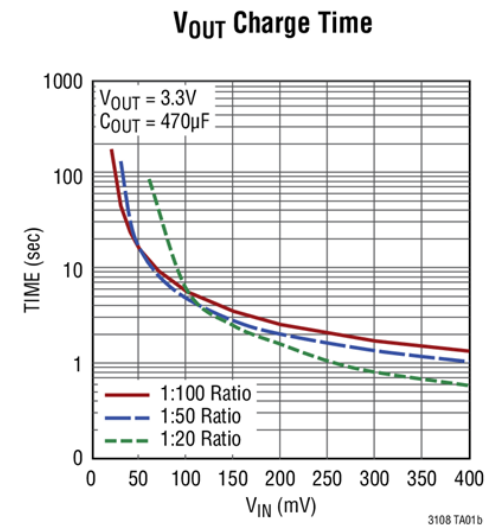
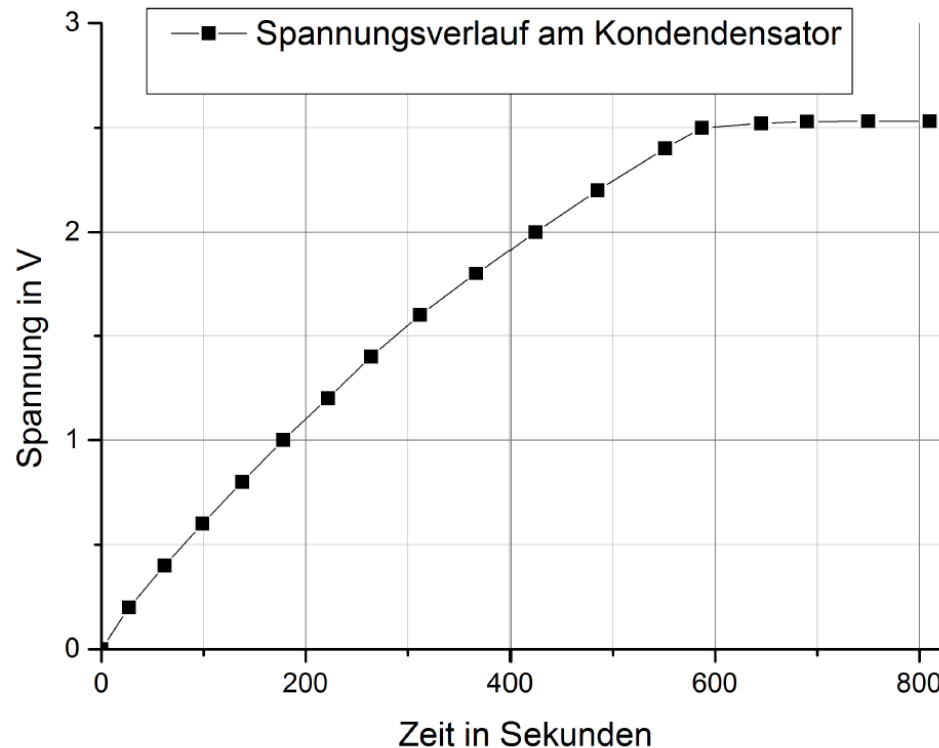
## Zweistufiger Wandler:

- Erste Stufe wie vorstehend beschrieben. Diese Stufe lädt einen Kondensator mit großer Kapazität (ca. 100 Farad) über einen längeren Zeitraum auf ca. 2,5V auf.
- Zweite Stufe kann dann mit gut verfügbaren Standard-Elektronikkomponenten gebaut werden. Die zweite Stufe läuft dann eine kürzere Zeit, aber bei deutlich höherer Leistung.
- Dadurch ist auch der Betrieb von Geräten möglich, die einen höheren Leistungsbedarf haben, wie z.B. Sensoren und Microcontroller z.B. zur Überwachung der Vorgänge in einer Kläranlage.





# Spannungs-Zeit-Diagramm beim Laden des Kondensators



<http://www.linear.com/product/LTC3108>

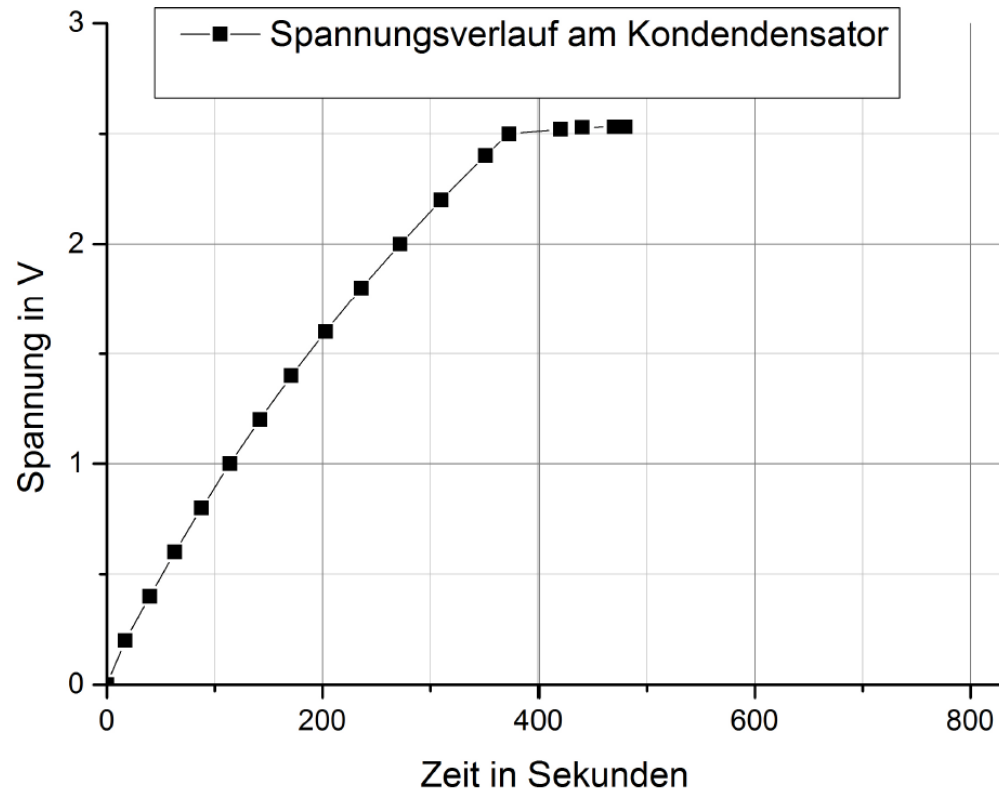
- ➔ Eingangsspannung 0,15V ➔ Bei niedriger Eingangsspannung Aufladung in ca. 10 min.
- ➔ Kommerzielle Schaltung bräuchte dafür mehr als 4 Stunden.
- ➔ Aus dem Speicherkondensator können durch kommerzielle DC/DC-Wandler kleinere Geräte betrieben werden.





# Spannungs-Zeit-Diagramm beim Laden des Kondensators mit zwei Wandlern

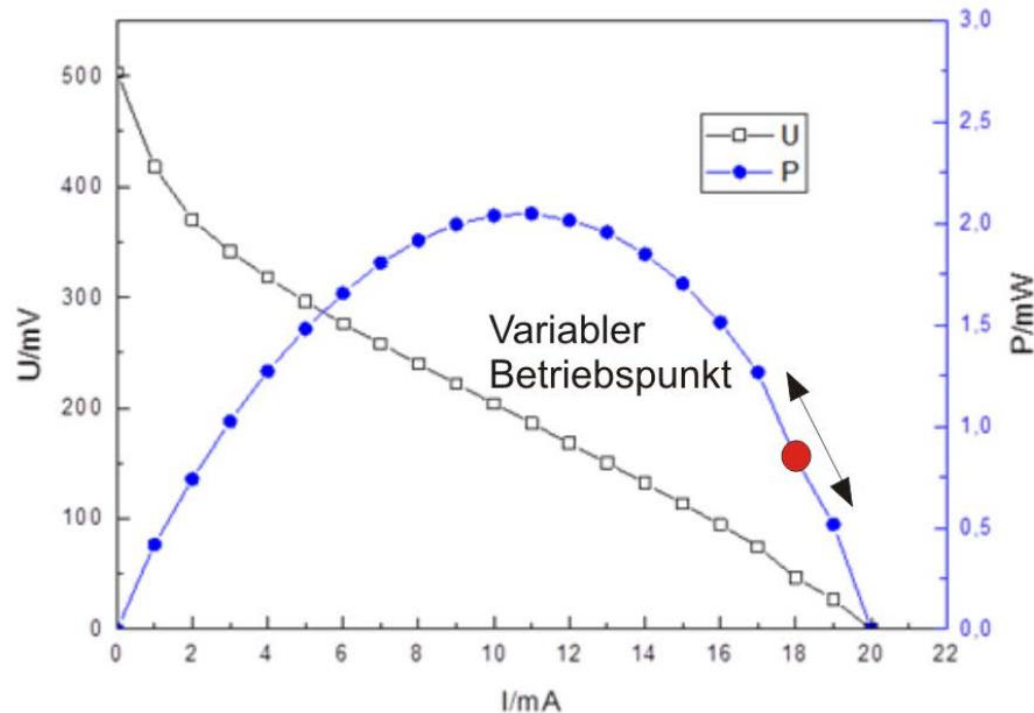
$U_1 = 0,12\text{V}$   $I_{\text{aus}1} = 11,8\text{mA}$   
 $U_2 = 0,15\text{V}$   $I_{\text{aus}2} = 15,4\text{mA}$   
 → zwei Wandler mit unterschiedlichen Eingangsspannungen  
 entspricht zwei MBZ mit individuell unterschiedlicher Leistung



- Spannung am Speicherkondensator steigt fast doppelt so schnell als mit einem Wandler.
- Konzept „mehrere Wandler speisen in einen Speicherkondensator ein“ funktioniert.
- Die Wandler beeinflussen sich gegenseitig nicht.
- Konzept „jede MBZ hat eigenen Wandler mit individueller Stromabgabe“ funktioniert.

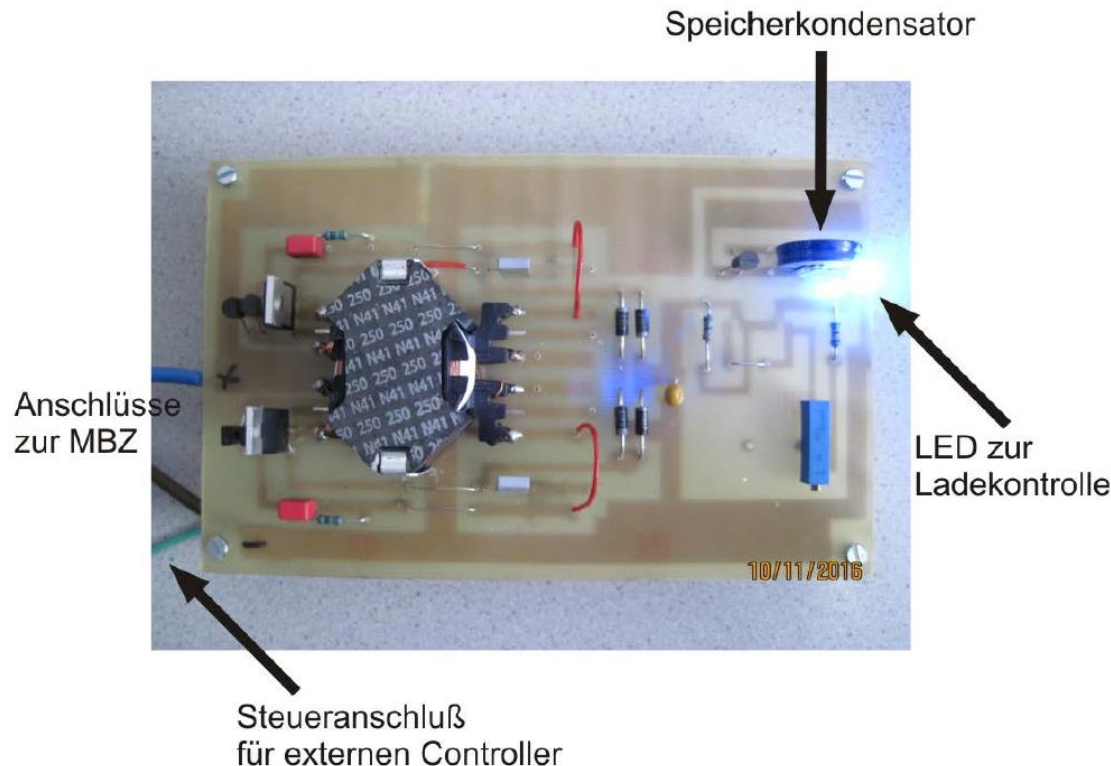


## Weitere Entwicklung von DC/DC-Wandlern für MBZ



- ➔ Ungeregelte Wandler ziehen soviel Strom aus der MBZ wie sie kriegen können.
- ➔ Dadurch kann der Betriebspunkt abseits vom aktuellen Zelleleistungsmaximum liegen.
- ➔ Entwicklung von DC/DC-Wandlern nötig mit „maximum power point tracking“.
- ➔ Bisher in der Literatur für MBZ nur vereinzelt erwähnt (für kleine Leistungen), z.B.: H. Wang, J. Park, Z. Ren: Environ. Sci. Technol. (2012), 46, 5247-5252

# Software ansteuerbarer DC/DC-Wandler für MBZ



- ➔ Übertragene Leistung ca. 250mW.
- ➔ Wirkungsgrad ca. 65%.
- ➔ Ein/Aus-schaltbar durch externes Signal.
- ➔ „Maximum power point tracking“ kann durch externen Controller erreicht werden.



## Zusammenfassung und Ausblick

- Automatisierte Steuerung von MBZ über individuell einstellbare Konstantstromquellen macht schnelle Leistungsentwicklung möglich.
- Individuelle DC/DC-Wandler speisen Energie in einen gemeinsamen Speicherkondensator (Konzept zur Energieausschleusung ohne Spannungsumkehr der BIO-BZ kann demonstriert werden).
- Aus dem Speicherkondensator kann ein handelsübliches Gerät betrieben werden.
- Anpassung der DC/DC-Wandler an aktuelles Leistungsmaximum der MBZ ist nötig, um maximale Leistung auszuschleusen.



## Danksagung

B. Jiang, T. Muddemann; ICVT TU Clausthal

H. Bormann, M. Niedermeiser, D. Haupt, O. Schläfer, M. Sievers; CUTECH

Arbeitsgruppen U. Schröder und R. Kreuzig; TU Braunschweig

Arbeitsgruppe H. Horn; Engler-Bunte-Institut Karlsruhe

Firma Eisenhuth R. Henkel, T. Hickmann

Remondis N. Sickora, Eurawasser J. Hinke

BMBF (WTER0219813)



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung