(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. Juni 2024 (20.06.2024)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2024/124266 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G05B 13/04 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/AT2023/060436

(22) Internationales Anmeldedatum:
12. Dezember 2023 (12.12.2023)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
A50952/2022 13. Dezember 2022 (13.12.2022) AT

(71) Anmelder: **AVL LIST GMBH** [AT/AT]; Hans-List-Platz 1, 8020 Graz (AT).

(72) Erfinder: **NGUYEN, Ngoc Anh**; Prochaskagasse 35/2, 8045 Graz (AT).

(74) Anwalt: **PATENTANWÄLTE PINTER & WEISS OG**; Prinz-Eugen-Strasse 70, 1040 Wien (AT).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW,

(54) **Title:** METHOD FOR CONTROLLING A TECHNICAL SYSTEM - OUTPUT VARIABLE MODEL

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN ZUR REGELUNG EINES TECHNISCHEN SYSTEMS - AUSGANGSGRÖSSENMODELL

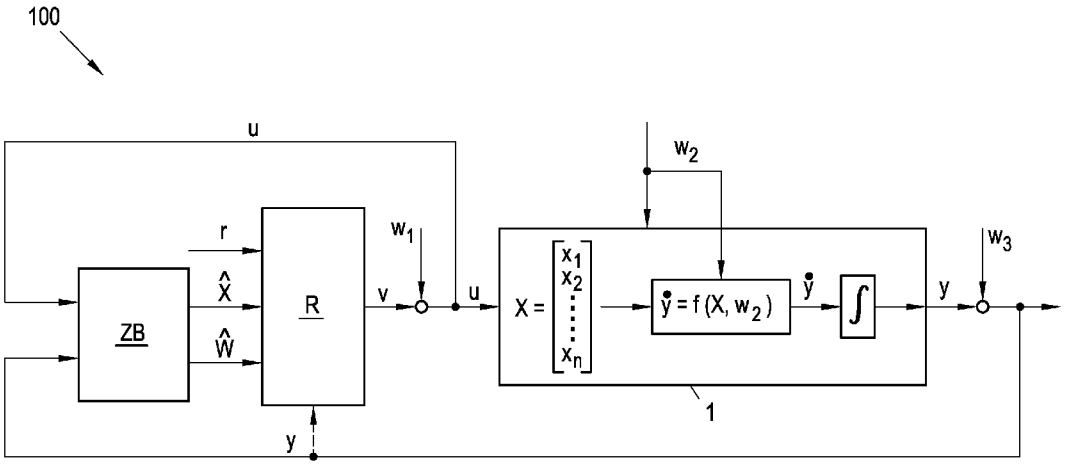


Fig. 1

(57) **Abstract:** The invention relates to a method for adjusting an output variable (y) of a technical system (1), the temporal behaviour of which is influenced by a disturbance variable wi, to a reference variable (r), in which method a mathematical state model (ZM) of the technical system (1) is extended by an output variable model (AM), which describes the temporal behaviour of the output variable (y) influenced by the at least one disturbance variable (w_I), to create an output-state model (AZM), and a current disturbance variable estimate ŵi of the disturbance variable w_I is determined by means of a state observer (ZB) designed on the basis of the output-state model (AZM).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2024/124266 A1

CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

(57) Zusammenfassung: Um eine Ausgangsgröße (y) eines technischen Systems (1), deren zeitliches Verhalten von einer Störgröße wi beeinflusst wird, auf eine Referenzgröße (r) einzuregeln, wird ein mathematisches Zustands-Modell (ZM) des technischen Systems (1) um ein Ausgangsgrößenmodell (AM), welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße (w_I) beeinflussten Ausgangsgröße (y) beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands- Modell (AZM) erweitert und es wird mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells (AZM) entworfenen Zustandsbeobachters (ZB) ein aktueller Störgrößen-Schätzwert Formula (I), (I), der Störgröße w_I ermittelt.

Verfahren zur Regelung eines technischen Systems - Ausgangsgrößenmodell

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung eines technischen Systems mit n Zustandsgrößen, zumindest einer auf das technische System wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen beeinflussenden Eingangsgröße, einer zu regelnden Ausgangsgröße und zumindest einer auf das System wirkenden und das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße beeinflussenden Störgröße, wobei ein mathematisches Zustands-Modell zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der n Zustandsgrößen angegeben wird und wobei ein Regler in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten aus einem Regelfehler, welcher eine Abweichung zwischen einer vorgegebenen Referenzgröße und der Ausgangsgröße beschreibt, eine Stellgröße ermittelt, welche dem technischen System als Eingangsgröße vorgegeben wird, um die Ausgangsgröße auf die Referenzgröße einzuregeln.

Die Behandlung von Störungen bzw. Störgrößen bei der Regelung eines technischen Systems ist ein zentrales Thema auf dem Gebiet der Regelungstechnik. Konkret können Störgrößen auf unterschiedliche Weise auf ein zu regelndes, technisches System wirken. In der regelungstechnischen Literatur wird hierbei eine Unterscheidung von auf den Eingang, den Ausgang oder auf den Zustand des zu regelnden Systems wirkenden Störgrößen getroffen (Eingangsstörung, Ausgangsstörung, Zustandsstörung). Neben Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsstörungen existiert eine Reihe weiterer regelungstechnisch relevanter Störungen, die sich beispielsweise aus Modellfehlern oder Parameterunsicherheiten ergeben können. Die Begriffe Störungen und Störgröße werden im Zuge der nachfolgenden Ausführungen synonym verwendet.

Unter einem „technischen System“ wird im Rahmen dieser Anmeldung ein System (Gerät, Anlage, Vorrichtung, Maschine, Gegenstand, Prüfstand, Aktuator, Wechselrichter, Umrichter, Gleichspannungswandler, DC/DC-Wandler usw.) verstanden, auf das durch zumindest eine Eingangsgröße eingewirkt werden kann. Durch das Einwirken mit der zumindest einen Eingangsgröße wird zumindest eine Zustandsgröße und/oder zumindest eine Ausgangsgröße des technischen Systems beeinflusst. Eine Ausgangsgröße ist typischerweise eine messbare oder gemessene Größe und ist üblicherweise eine Größe, die mit der Regelung geregelt werden soll, bei einem DC/DC-Wandler beispielsweise ein Laststrom oder eine Lastspannung oder ein anderer Strom oder eine andere Spannung. „Regeln“ bedeutet, dass die Ausgangsgröße zu jedem Zeitpunkt bzw. zu jedem Regelungszeitschritt an eine vorgegebene Referenzgröße der Regelung angeglichen wird. Eine Zustandsgröße ist typischerweise eine, vielfach nicht messbare oder nicht gemessene, interne Größe des technischen Systems, beim genannten Beispiel eines DC/DC-Wandlers z.B. Ströme und/oder Spannungen. Die Eingangsgröße wirkt über ein Stellglied auf das

technische System, wobei das Stellglied natürlich von der Art der Eingangsgröße abhängig ist. Dazu wird vom Regler des technischen Systems eine Stellgröße ermittelt, mit der das Stellglied angesteuert wird, bei einem DC/DC-Wandler beispielsweise ein PWM-Muster zum Schalten von Halbleiterschaltern im DC/DC-Wandler oder Schaltimpulse. Diese Zusammenhänge sind im Bereich der Regelungstechnik hinlänglich bekannt.

In der Regelungstechnik kennt man unterschiedliche Ansätze, um mit auf ein technisches System wirkenden Störgrößen umzugehen. Eine klassische Methode ist die sogenannte Störgrößenaufschaltung, bei der, vereinfacht gesprochen, eine von einem Regler ermittelte Stellgröße mit einer geeigneten Kompensationsgröße überlagert wird, um die Auswirkung der Störgröße (zumindest teilweise) zu kompensieren. Die Kompensationsgröße leitet sich dabei typischerweise aus der Störgröße ab. Wirkt beispielsweise eine Eingangsstörung auf den Eingang des zu regelnden Systems, ist es oftmals bereits ausreichend, den Wert der Eingangsstörung von der vom Regler ermittelten Stellgröße zu subtrahieren, um die Wirkung der Eingangsstörung (zumindest weitgehend) auszugleichen. Bei auf den Zustand (Zustandsstörungen) oder auf den Ausgang (Ausgangsstörung) wirkenden Störgrößen kann es hingegen erforderlich sein, ein Übertragungsverhalten des zu regelnden Systems (also wie der Eingang auf den Ausgang oder den Zustand wirkt) bei der Ermittlung einer Kompensationsgröße zu berücksichtigen.

Ein in diesem Kontext vielbeachtetes Problem ist die Fragestellung, wie eine Störgrößenaufschaltung auch in Szenarien ermöglicht werden kann, in denen eine Störgröße nicht direkt messbar ist und damit unbekannt ist. Zur Lösung dieses Problems sind verschiedene Herangehensweisen bekannt, wobei sich insbesondere die Methode der Störgrößenbeobachtung als ein universell einsetzbarer und oft besonders präziser Ansatz hervorgetan hat. Typischerweise wird dabei mittels eines Schätzers (in der Regelungstechnik und nachfolgend als „Beobachter“ bzw. konkret als „Störgrößenbeobachter“ bezeichnet) eine Schätzung der Störgröße bereitgestellt, die in weiterer Folge zur Kompensation herangezogen wird. Es kann jedoch auch in Fällen, in denen eine Störgröße messbar ist, vorteilhaft oder sogar erforderlich sein, eine Schätzung der Störgröße zu ermitteln, z.B. weil die Messung der Störgröße verzögert oder aufgrund von in der Praxis auftretenden Schmutzeffekten verfälscht ist.

Allgemein können in der Regelungstechnik eine hohe Regelungsgüte, also insbesondere eine hohe Regelgenauigkeit, eine kurze Anstiegszeit, ein geringes Überschwingen oder auch ein Einsatz von wenig Stellenergie, als übliche Anforderungen genannt werden. Wirkt nun eine Störgröße auf ein zu regelndes System, und soll die Störgröße mittels eines Störgrößenbeobachters geschätzt und anschließend auf Basis der Schätzung kompensiert werden, ist es vielfach nötig, Forderungen an die Regelungsgüte auch beim Entwurf von Störgrößenbeobachtern zu berücksichtigen. Wie nachfolgend detailliert ausgeführt wird,

kann sich insbesondere die Forderung nach hoher Regelgenauigkeit auf die Schätzung und Kompensation von Störgrößen auswirken. Die Regelgenauigkeit bewertet hierbei die Abweichung bzw. den Regelfehler zwischen einer zu regelnden Größe, üblicherweise einer Ausgangsgröße des zu regelnden Systems, und einer für diese zu regelnde Größe vorgegebenen Referenzgröße (einem vorgegebenen Sollwert). Eine hohe Regelgenauigkeit steht bekanntermaßen für einen geringen, im Idealfall verschwindenden Regelfehler.

Im gegenständlichen Zusammenhang sind Störgrößen als eine oft wesentliche Ursache für eine unzureichende Regelgenauigkeit zu nennen. Konkret wird z.B. im Fall störungsbehafteter Ausgangsgrößen anstelle der eigentlich zu regelnden Ausgangsgröße die verschobene Größe „Ausgangsgröße plus Ausgangsstörung“ geregelt, wodurch es zu einer Abweichung zwischen der eigentlichen Ausgangsgröße und der Referenzgröße um die Ausgangsstörung kommt. In der regelungstechnischen Literatur spricht man dabei von einem „Offset“. Dabei gilt, dass je genauer und dynamischer eine Ausgangsstörung geschätzt werden kann, ein durch die Ausgangsstörung verursachter Offset entsprechend genauer und dynamischer korrigiert werden kann. Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich Regelungsgenauigkeit sind demnach in vielen Fällen unmittelbar übertragbar auf Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich Störgrößenbeobachtung und -kompensation.

Unter anderem um den genannten Genauigkeitsanforderungen gerecht zu werden, greifen moderne Ansätze, wie z.B. in „Offset-free reference tracking with model predictive control” Automatica 46, 1469-1476, Maeder, U., & Morari, M., 2010, “Offset-free tracking MPC: A tutorial review and comparison of different formulations” European Control Conference (ECC). Linz, Austria, Pannocchia, G., 2015, oder “Offset-free MPC explained: novelties, subtleties, and applications” 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control. Seville, Spain, Pannocchia, G., & Gabiccini, M., & Artoni, A., 2015, publiziert, auf stetig komplexer werdende Konzepte zur Störgrößenkompensation zurück. In den zitierten Schriften wird dabei ein bereits bestehender Zustandsbeobachter, wie er in der Regelungstechnik zur Beobachtung von nicht messbaren Zustandsgrößen eines Systems üblich ist, um weitere (Beobachter-)Anteile zur Beobachtung von Störgrößen ergänzt.

Die in den Zustandsbeobachtern nach Stand der Technik ergänzten Anteile sind dabei aufgrund der erwähnten Genauigkeitsanforderungen in vielen Fällen komplex und mathematisch aufwendig. Bei der Auswertung der resultierenden Beobachtergleichungen stößt man deshalb im realen Betrieb, insbesondere bei Systemen mit begrenzter Rechenkapazität, häufig an die für die Praxis wichtige Grenze der Echtzeitfähigkeit. Vor allem in Kombination mit bereits von sich aus rechenintensiven Regelungsstrategien, wie Model-Predictive-Control (MPC), Adaptive Control (AC) oder anderen optimierungsbasierten Regelungsalgorithmen, können komplexe und aufwendige Störgrößenbeobachter demnach oft nicht angewandt werden. Erschwerend tritt dabei hinzu, dass bei modernen

Regelungssystemen auf zunehmend höhere Taktraten und damit zeitlich kürzer werdende Abtastintervalle zurückgegriffen wird. Selbst wenn leistungsstarke Rechnerarchitekturen zur Umsetzung der genannten Regelungs- und/oder Beobachtertechniken verwendet werden, entstehen durch die Verkürzung der zwischen zwei Regelungs-Zeitschritten zur Verfügung stehenden Zeit, in welcher aber sämtliche für die Regelung und/oder Beobachtung nötigen Berechnungen durchzuführen sind, in vielen Fällen Engpässe hinsichtlich Echtzeitfähigkeit. Unter Echtzeitfähigkeit ist hierbei zu verstehen, dass die Stellgrößen vom Regler innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne ermittelt werden können.

Ein weiteres im Stand der Technik unzureichend beachtetes Problem stellt sich, wenn Störgrößen das zeitliche Verhalten bzw. die zeitliche Veränderung einer zu regelnden Ausgangsgröße beeinflussen. Insbesondere wenn auf diese Weise gestörte Ausgangsgrößen in dynamischer Wechselwirkung mit den Zustandsgrößen eines technischen Systems stehen, ergibt sich oftmals die Fragestellung, wie ein geeignetes mathematisches Modell für die gegebenen Ausgangsgrößen angegeben werden kann. Mathematische Modelle bzw. mathematische Beschreibungen für zu regelnde Ausgangsgrößen sind vielfach eine notwendige Voraussetzung für den Entwurf eines geeigneten Reglers zum Regeln einer oder mehrerer Ausgangsgrößen. Im geschilderten Szenario gestörter Ausgangsgrößen ist deshalb bei der Modellierung einerseits darauf zu achten, dass das zeitliche Verhalten der Ausgangsgrößen an sich präzise beschrieben wird, also der Einfluss der Störgrößen akkurat abgebildet wird, dass andererseits aber ebenso die Wechselwirkung mit den übrigen Zustandsvariablen korrekt abgebildet wird, wobei darauf zu achten ist, dass die mathematische Komplexität eines Modells kein Maß annimmt, das die bereits diskutierte Echtzeitfähigkeit gefährden könnte. Auch dieses Problemfeld wird im Stand der Technik nur unzureichend aufgegriffen.

Es ist demnach eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung, eine präzise aber dennoch recheneffiziente Methode zur Schätzung und Kompensation von auf ein zu regelndes System wirkenden Störgrößen anzugeben.

Diese Aufgabe wird für ein eingangs genanntes Verfahren durch die Merkmale der Kennzeichen der unabhängigen Ansprüche gelöst. Die unabhängigen Ansprüche beschreiben hierbei ein Verfahren zur Regelung eines technischen Systems sowie ein technisches System.

Konkret wird im Rahmen der Erfindung von einem technischen System mit n Zustandsgrößen ausgegangen, mit zumindest einer auf das technische System wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen beeinflussenden Eingangsgröße, einer zu regelnden Ausgangsgröße und zumindest einer auf das System wirkenden und das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße beeinflussenden Störgröße. Wie in der Regelungstechnik

üblich, wird hierbei ein mathematisches Zustands-Modell zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der n Zustandsgrößen angegeben. Um die Ausgangsgröße auf eine vorgegebene Referenzgröße einzuregeln, ermittelt ein Regler in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten aus einem Regelfehler, der eine Abweichung zwischen der Referenzgröße und der Ausgangsgröße beschreibt, eine Stellgröße, welche dem technischen System als Eingangsgröße zum Regeln vorgegeben wird.

Erfindungsgemäß ist für ein solches System vorgesehen, das mathematische Zustands-Modell um ein Ausgangsgrößenmodell, welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße beeinflussten Ausgangsgröße beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell zu erweitern. Das Ausgangsgrößenmodell weist dabei einen von der Ausgangsgröße abhängenden Dynamik-Anteil und einen von der Ausgangsstörung abhängenden Fehler-Anteil auf. Während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes wird mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells entworfenen Zustandsbeobachters ein aktueller Störgrößen-Schätzwert für die zumindest eine Störgröße ermittelt. Der ermittelte Störgrößen-Schätzwert wird, ebenso während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes, dem Regler zugeführt, sodass der Regler den Störgrößen-Schätzwert bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße berücksichtigen kann.

Neben einer Reihe von nachfolgend diskutierten Vorteilen erlaubt das erfindungsgemäße Verfahren insbesondere, auch in Situationen eine modellbasierte Beobachtung bzw. Schätzung und/oder eine modellbasierte Regelung einzusetzen, in denen der Einsatz modellbasierter Konzepte ansonsten nur schwer möglich ist. Gründe für einen erschwerten Einsatz eines modellbasierter Konzeptes können sein, dass das dynamische Verhalten einer zu regelnden Ausgangsgröße stark durch Störgrößen beeinflusst ist, oder dass die Dynamik einer zu regelnden Ausgangsgröße unbekannt ist oder sich sehr schnell ändert. Im Rahmen der Erfindung wurde dahingehend erkannt, dass es in einer großen Zahl an Fällen, in denen sich die Modellierung der zu regelnden Ausgangsgröße als schwierig erweist, möglich ist, einen erfindungsgemäßen Modellansatz für die Ausgangsgröße mit einem Dynamik-Anteil und einem Fehler-Anteil in ein bereits bestehendes Zustands-Modell zu integrieren. Damit wird eine modellbasierte Beobachtung und Regelung möglich, was in vielen für die Praxis relevanten Anwendungsfällen zu mitunter signifikanten Verbesserungen führt, insbesondere hinsichtlich Unterdrückung von auf Ausgangsgrößen wirkenden Störungen und Regelungsgenauigkeit.

In einer besonders vorteilhaften Weise kann vorgesehen sein, den Dynamik-Anteil als ausschließlich von der Ausgangsgröße abhängig zu gestalten und den Fehler-Anteil als ausschließlich von der zumindest einen Störgröße abhängig zu gestalten. Auf diese Weise werden die das dynamische Verhalten der Ausgangsgröße beeinflussenden Größen getrennt, sodass beim Entwurf eines Störgrößenbeobachters, der die auf die Ausgangsgröße

wirkende Störgröße beobachtet, lediglich der Fehler-Anteil berücksichtigt werden muss. Der Entwurf von Beobachtern kann auf diese Weise wesentlich vereinfacht werden.

Die gewählte Struktur des Ausgangsgrößenmodells erlaubt es nicht nur, eine zu regelnde Ausgangsgröße modellhaft zu beschreiben. Aufgrund des Aufbaus aus zwei voneinander separaten Modellteilen wird es unter anderem möglich, besonders vorteilhafte Strukturen aus Zustands-Beobachtern und Störgrößen-Beobachtern zur Schätzung insbesondere von auf Ausgangsgrößen wirkenden Störgrößen einzusetzen.

Konkret kann dazu vorgesehen sein, zunächst während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes mittels eines Zustandsbeobachters für zumindest eine Zustandsgröße der n Zustandsgrößen des technischen Systems einen aktuellen Zustands-Schätzwert zu ermitteln. Darauf aufbauend kann mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells entworfenen Störgrößenbeobachters, unter Berücksichtigung eines aktuellen Regelfehlers und/oder zumindest eines vergangenen Regelfehlers, sowie aus dem aktuellen, zumindest einen mit dem Zustandsbeobachter ermittelten Zustands-Schätzwert, sowie aus bekannten Zustands-Schätzwerten von zumindest einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt ein aktueller Störgrößen-Schätzwert ermittelt werden. Bei diesem Störgrößen-Schätzwert kann es sich bevorzugt um die auf die Ausgangsgröße wirkende Störgröße handeln. In einer ebenso vorteilhaften Weise können im Zuge dieser Schätzung aber auch weitere Störgrößen geschätzt werden und in weiterer Folge bei der Regelung eingesetzt werden.

Diese besondere Herangehensweise bei der Ermittlung von Störgrößen-Schätzwerten weist die Besonderheit auf, dass Regelfehler bei der Beobachtung, insbesondere bei der Störgrößenbeobachtung, berücksichtigt werden. Diesem Ansatz liegt die bemerkenswerte Einsicht zugrunde, dass durch die Verwendung von Regelfehlern als zusätzliche Korrekturterme in einem Störgrößenbeobachter besonders genaue Schätzungen von Störungen ermittelt werden können. Obwohl durch den Ansatz der Verwendung von Regelfehlern bei der Schätzung von Störungen mitunter signifikante Genauigkeitsverbesserungen möglich sind, und das bei einer nur verschwindenden Erhöhung der Komplexität der resultierenden Regelkreise, geht diese Idee weder aus dem zitierten Stand der Technik hervor, noch aus der einschlägigen regelungstechnischen Fachliteratur. Gerade aufgrund der speziellen Struktur des erfindungsgemäßen Ausgangsgrößenmodells mit einem Fehler-Anteil zur Beschreibung der Ausgangsgröße wird es möglich, die beschriebene Vorgehensweise zur Störgrößenbeobachtung, basierend auf Regelfehlern, mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zu verknüpfen.

Ein weiterer wichtiger Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist seine Flexibilität, vor allem in der vorteilhaften Ausführung basierend auf der beschriebenen Kombination aus

Zustandsbeobachter und Störgrößenbeobachter. So kann die Erfindung durch meist nur geringfügige Änderungen passgenau an verschiedene Anwendungsfälle adaptiert werden.

Konkret kann der beschriebene Zustandsbeobachter natürlich auch für sämtliche der n Zustandsgrößen Zustands-Schätzwerte ermitteln. Dafür kann dem Zustandsbeobachter eine Anzahl an Messwerten der Eingangsgröße und/oder der Ausgangsgröße und/oder von Zustandsgrößen zugeführt werden, welche der Anzahl von auf das technische System wirkenden Störungen entspricht, um auch besonders hohen Genauigkeitsanforderungen gerecht zu werden.

Weiters kann ein dem aktuellen Regelungs-Zeitschritt unmittelbar vorhergehender Regelungs-Zeitschritt als vergangener Regelungs-Zeitschritt verwendet werden, um auch bei hochdynamischen bzw. sehr schnellen technischen Systemen, d.h. bei Systemen mit kleinen Zeitkonstanten, akkurate Schätzungen der Störgrößen bereitstellen zu können. Weist ein technisches System hingegen große Zeitkonstanten auf, kann es demgegenüber vorteilhaft sein, zeitlich voneinander weiter entfernt liegende Regelungs-Zeitschritte zur Schätzung heranzuziehen. Natürlich kann ebenso eine Mehrzahl von vergangenen Regelungs-Zeitschritten verwendet werden, beispielsweise um eine Mittelwertbildung über einen zeitlichen Verlauf der Zustandsgrößen bei der Schätzung von Störgrößen im Störgrößenbeobachter zu berücksichtigen.

Ein weiterer Punkt, in dem die Erfindung in der vorteilhaften Ausgestaltung basierend auf einer Kombination aus Zustandsbeobachter und Störgrößenbeobachter besonders flexibel an spezifische Anforderungen eines speziellen Anwendungsfalls angepasst werden kann, ist die Art der Berücksichtigung der Regelfehler bei der Schätzung der Störgrößen. Als besonders vorteilhafte Herangehensweise hat sich hierbei hervorgetan, den aktuellen Regelfehler als durch zumindest einen linearen Gewichtungsfaktor gewichteten aktuellen Regelfehler bei der Ermittlung der Störgrößen-Schätzwerte zu berücksichtigen. Wie nachfolgend im Detail gezeigt wird, wird auf diese Weise eine Verbindung zur aus der Regelungstechnik hinlänglich bekannten Zustandsregelung geschaffen. Beispielsweise können die genannten, linearen Gewichtungsfaktoren dadurch auf besonders einfache Weise anhand von Mitteln zur Auslegung von z.B. Zustandsreglern gewählt werden können, z.B. durch die hinlänglich bekannte Formel nach Ackermann.

Ein wesentlicher Vorteil der Struktur aus kaskadierten Beobachtern und einem wie oben beschriebenen Regler liegt weiters in der nach wie vor gegebenen Einfachheit des resultierenden Gesamtsystems und den damit einhergehenden geringen Ausführungszeiten, wobei insbesondere die erzielbare Regelgenauigkeit nicht beeinträchtigt wird.

Weiters wird die der Erfindung zu Grunde liegende Aufgabe durch einen Regelkreis zur Regelung eines technischen Systems gelöst, in welchem eine Steuereinheit zur Umsetzung

der erfindungsgemäßen Verfahrensschritte vorgesehen ist. Dabei wurde erkannt, dass die bisherigen Ausführungen insbesondere auf Prüfstandssysteme für die Entwicklung und Testung von Batteriesystemen, insbesondere von Batteriesystemen von elektrischen Antriebssträngen, übertragbar sind. Im Zuge der Entwicklung von derartigen Batteriesystemen werden vielfach sogenannte Hardware-in-the-Loop (HiL)-Tests auf Hardware-in-the-Loop-Prüfstandssystemen (HiL-Prüfstände) durchgeführt, um die parallele Entwicklung von Komponenten elektrischer Antriebsstränge zu ermöglichen und so Entwicklungszeiten zu verkürzen. Als Komponenten von elektrischen Antriebssträngen sind hierbei insbesondere Batteriesysteme (Energiespeicher wie Akkumulatoren oder Batterien oder Bordbatterien), aber auch Elektromotoren, Getriebe, Antriebswellen und elektrische Umrichter zu nennen.

Bei HiL-Tests werden physikalisch vorhandene Komponenten auf einem HiL-Prüfstand real aufgebaut und physikalisch nicht vorhandene Komponenten durch entsprechende mathematische Simulations-Modelle ersetzt. Mithilfe von hochdynamischen Aktoren werden Referenzgrößen bzw. Zeitverläufe von Referenzgrößen, die sich aus einer Berechnung der Simulations-Modelle in Echtzeit während des Betriebs des HiL-Prüfstands ergeben und die das zeitliche Verhalten der physikalisch nicht vorhandenen Komponenten beschreiben, eingeregelt. In bekannter Weise kann so für zu testende Komponenten, die am HiL-Prüfstand real vorhanden sind, die im Realbetrieb zu erwartende Umgebung nachgebildet bzw. „emuliert“ werden. Die Belastung am HiL-Prüfstand entspricht der im Realbetrieb zu erwartenden Real-Belastung, obwohl teils mehrere Komponenten nicht physikalisch vorhanden sind.

Auf die gegenständliche Erfindung umgelegt kann ein oben genannter, hochdynamischer Aktor als zu regelndes technisches System aufgefasst werden. Konkret kann ein hochdynamischer Aktor hierbei in Form eines elektrischen Stromrichters, z.B. als Hochsetzsteller, Tiefsetzsteller (auch Abwärtswandler, Buck Converter, „Interleaved Buck Converter“ genannt), Wechselrichter, Frequenzumrichter usw. gegeben sein, der die Belastung eines zu testenden Batteriesystems, z.B. einer Bordbatterie, nachbildet. Die Belastung eines zu testenden Batteriesystems ergibt sich hierbei typischerweise aus dem Betriebszustand des vom Batteriesystem versorgten elektrischen Antriebsstrang und der vom elektrischen Antriebsstrang aufgenommenen elektrischen Energie, wobei der elektrische Antriebsstrang im Fall eines HiL-Tests nicht physikalisch vorhanden ist und in einer vorteilhaften Weise in einem Simulations-Modell nachgebildet wird.

Da die Anforderungen an Batterietests stets anspruchsvoller werden, müssen auch Batterietestsysteme fortlaufend dynamischer, präziser und recheneffizienter gestaltet werden. Auch können verschiedenste Störgrößen auf ein Batterietestsystem wirken, wobei insbesondere die in vielen Fällen unbekannte Rückwirkung des zu testenden

Batteriesystems auf den hochdynamischen Aktor eine wesentliche Störgröße darstellen kann. Die bei modernen elektrischen Antriebssträngen gegebenen und mitunter sehr hohen Abtastraten können in Kombination mit komplexen Simulations-Modellen sowie mit aufwendigen Störgrößenbeobachtern zu den eingangs erwähnten Problemen hinsichtlich Echtzeitfähigkeit führen. Unter anderem aus diesen Gründen sind Batterietestsysteme ein prädestiniertes Einsatzgebiet für das erfindungsgemäße Verfahren, was nachfolgend im Detail dargelegt wird.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 5 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 einen Koppelplan zur Regelung eines technischen Systems,

Fig.2 einen Koppelplan zur Regelung eines technischen Systems mit einer Kaskade aus einem Zustandsbeobachter und einem Störgrößenbeobachter,

Fig.3 einen bidirektionalen DC/DC-Wandler,

Fig.4 ein Ersatzschaltbild eines bidirektionalen DC/DC-Wandlers,

Fig.5a, 5b mit dem erfindungsgemäßen Verfahren und mit einem Verfahren nach Stand der Technik erzielte Resultate.

Fig.1 zeigt einen Koppelplan zum Regeln eines technischen Systems 1. Das in Fig.1 gezeigte technische System 1 weist $n \geq 1$ Zustandsgrößen $x_1, ..., x_n$ und zumindest eine Eingangsgröße u auf, welche auf das technische System 1 wirkt und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen $x_1, ..., x_n$ beeinflusst. Auf das technische System 1 wirken weiters die Störgrößen w_1, w_2, w_3. Es ist im Rahmen der Erfindung nicht erforderlich, dass immer alle Störgrößen w_1, w_2, w_3 wirken, sondern es ist ausreichend, wenn zumindest die Störgröße w_2 wirkt. Die Störgröße w_1 wirkt als Eingangsstörung, die Störgröße w_2 als Zustandsstörung und die Störgröße w_3 als Ausgangsstörung, die sich der Ausgangsgröße y additiv überlagert. Die Anzahl p von Störgrößen wird nachfolgend mit p bezeichnet, wobei angemerkt sei, dass die Anzahl nicht auf p=3 beschränkt ist. Im Rahmen der Erfindung kann eine beliebige Anzahl zwischen 1 und n von Störgrößen wirken, wobei es ebenso denkbar ist, dass die genannten Störgrößen w_1, w_2, w_3 wiederum selbst mehrere Störgrößen repräsentieren, sodass w_2 beispielsweise für mehrere Zustandsstörungen stehen kann.

Für die nachfolgenden Ausführungen ist von Bedeutung, dass die Störgröße w_2 das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße y beeinflusst. Dieser Umstand ist durch die im zu regelnden System 1 vorgesehenen Blöcke 11 und 12 beispielhaft und rein schematisch berücksichtigt. Dabei repräsentiert Block 11 die Bildung einer zeitlichen Ableitung $\dot{y}$ der Ausgangsgröße y,

und Block 12 eine Integration, mittels derer aus der genannten Ableitung $\dot{y}$ die Ausgangsgröße y bestimmt wird.

Eine Zustandsgröße x_i (i dient hier als Index, um die n Zustandsgrößen allgemein zu referenzieren) dient der Beschreibung des inneren Verhaltens eines technischen Systems 1. Typischerweise sind zur Charakterisierung des Zustandes bzw. zur Charakterisierung des inneren Verhaltens eines technischen Systems 1 mehrere Zustandsgrößen $x_1, ..., x_n$ erforderlich. Mehrere Zustandsgrößen x_i werden typischerweise zu einem Zustandsvektor $\mathbf{X} = [x_1, x_2, ..., x_n]^T$ zusammengefasst (Vektoren und Matrizen werden nachfolgend vorzugsweise groß und fett notiert). Die Anzahl an Zustandsgrößen $x_1, ..., x_n$ legt die Ordnung eines technischen Systems 1 fest. Auch bei den für die gegenständlichen Ausführungen wichtigen Störgrößen w_1, w_2, w_3 wird nachfolgend auf eine vektorielle Notation zurückgegriffen, und mit dem Störgrößenvektor $\mathbf{W} = [w_1, w_2, ..., w_p]^T$ die $1 \leq p \leq n$ wirkenden Störgrößen gesammelt bezeichnet. Auch für Störgrößen w_1, w_2, w_3 kann mit dem Index l=1,...,p die Bezeichnung w_l für eine einzelne Störgröße angegeben werden.

Bei technischen Systemen 1 wie dem in Fig.1 gezeigten wird bekanntermaßen das Ziel verfolgt, mittels eines Reglers R eine Ausgangsgröße y des technischen Systems 1 an einen durch eine vorgegebene Referenzgröße r vorgegebenen Wert anzugleichen, also die zu regelnde Ausgangsgröße y auf die Referenzgröße r einzuregeln. Zu diesem Zweck ermittelt der Regler R in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten, üblicherweise im Mikrosekunden bis Millisekunden Bereich, aus einem Regelfehler e_y, welcher eine Abweichung zwischen der Referenzgröße r und der Ausgangsgröße y beschreibt, z.B. als Differenz e_y=r-y, eine Stellgröße v, welche dem technischen System 1 als Eingangsgröße u vorgegeben wird, und durch welche der Regelfehler e_y im Idealfall zu Null gebracht wird.

Wie bei Regelkreisen wie dem in Fig.1 gezeigten üblich, wird im Kontext der gegenständlichen Erfindung davon ausgegangen, dass Messgrößen zumindest eines Teils der im Regelkreis 200 gegebenen Größen erfasst werden. Folglich können die zumindest eine Eingangsgröße u und/oder die zumindest eine Ausgangsgröße y und/oder zumindest eine der n Zustandsgrößen $x_1...x_n$ gemessen werden und zur Regelung weiterverarbeitet werden. Zu diesem Zweck können eine oder mehrere geeignete Messdaten-Erfassungseinheiten vorgesehen sein, wie Sensoren oder Spannungssensoren oder Stromsensoren oder Geschwindigkeitssensoren oder Positionssensoren usw., was dem Fachmann auf dem Gebiet der Regelungstechnik natürlich hinlänglich bekannt ist. Typischerweise werden bei Regelkreisen wie dem in Fig.1 gezeigten die Eingangsgröße u und die Ausgangsgröße y des technischen Systems 1 messtechnisch erfasst, es ist aber ebenso denkbar, dass zusätzlich auch ausgewählte Zustandsgrößen x_i gemessen werden,

oder dass anstatt der Eingangsgröße u und der Ausgangsgröße y lediglich Zustandsgrößen x_i gemessen werden.

Im Zuge des Betriebs eines wie in Fig.1 gezeigten Regelkreises 100 erfolgt eine üblicherweise fortlaufende Vorgabe der Referenzgröße r, was zu einem zeitlichen Verlauf der Referenzgröße r führt. Im Fall einer auf einem Digitalrechner umgesetzten Regelung ist „fortlaufend" zu verstehen als eine Vorgabe der Referenzgröße r in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten der Regelung. In der Folge wird davon ausgegangen, dass eine Abtastung mit einer Abtastzeit T_s erfolgt. Bekanntermaßen legt eine Abtastung mittels einer Abtastzeit T_s diskrete Zeitpunkte $t_k = k \cdot T_s$ fest, welche die gegenständlichen Regelungs-Zeitschritte festlegen. Wie in der Digitaltechnik üblich, wird im Folgenden zur Bezugnahme auf einen diskreten Regelungs-Zeitschritt t_k oft nur der Index k herangezogen, der einen diskreten Regelungs-Zeitschritt t_k entsprechend der obigen Vorschrift festlegt. Im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen werden an mehreren Stellen Zustandsgrößen $x_1 \ldots x_n$ oder Störgrößen w_1, w_2, w_3 oder Eingangsgröße u usw. explizit einem bestimmten Regelungs-Zeitschritt t_k zugeordnet, wozu der entsprechende Index im Subskript der entsprechenden Größen angeführt wird, z.B. $x_{1,k}$.

Im in Fig.1 gezeigten Fall ist weiters ein Zustandsbeobachter ZB zur Schätzung von Zustandsgrößen x_i und Störgrößen w_l vorgesehen. Ausgehend von der Referenzgröße r, einem vom Zustandsbeobachter ZB ermittelten Schätzwert $\widehat{\boldsymbol{X}}$ des Zustandsvektors **X**, wobei $\widehat{\boldsymbol{X}}$ einen Vektor $\widehat{\boldsymbol{X}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_n]^T$ von Zustands-Schätzwerten der Zustandsgrößen x_i darstellt, und einem vom Zustandsbeobachter ZB ermittelten Schätzwert $\widehat{\boldsymbol{W}}$ des Störgrößenvektors **W**, wobei $\widehat{\boldsymbol{W}}$ einen Vektor von Störgrößen-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{W}} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \ldots, \hat{w}_p]^T$ der Störgrößen w_l darstellt, ermittelt der Regler R im in Fig.1 gezeigten Fall die Stellgröße v, die dem technischen System 1 als Eingangsgröße u vorgegeben wird. Zur Umsetzung des Reglers R können verschiedene Regelgesetze eingesetzt werden, wie Model-Predictive-Control (MPC), Adaptive Control (AC), Linear-Quadratic-Regulators (LQR), oder andere optimierungsbasierte Regelungsalgorithmen, aber auch Regelungsalgorithmen wie Sliding-Mode-Control, Backstepping-Control oder flachheitsbasierte Regler, wobei die Wahl des Regelgesetzes für die Erfindung unerheblich ist.

Wie in Fig.1 gezeigt, kann der Regler R auch direkt auf eine gemessene Ausgangsgröße y zurückgreifen, was durch den strichlierten Eingang in den Regler R angedeutet ist. Werden dem Regler R aber ohnehin vom Zustandsbeobachter ZB Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}}$ zugeführt, auf deren Basis der Regler R die Regelung durchführen kann, ist ein direkter Zugriff auf die Ausgangsgröße y vielfach nicht erforderlich. Als Zustandsbeobachter ZB zur Schätzung von Zustandsgrößen x_i und Störgrößen w_l werden in der Praxis häufig

Zustandsbeobachter ZB vom sogenannten Luenberger-Typ eingesetzt, wobei auch andere Beobachtertypen angewandt werden können, wie z.B. Kalman-Filter.

Im in Fig.1 gezeigten Koppelplan erfolgt eine kombinierte Schätzung von Zustandsgrößen x_i und Störgrößen w_l. Im Stand der Technik wird dazu vielfach folgendermaßen vorgegangen: Aufbauend auf sogenannten Störgrößenmodellen, also Modellen des dynamischen bzw. zeitlichen Verhaltens der zu schätzenden Störgrößen w_l, wird ein bestehendes mathematisches Modell des zu regelnden technischen Systems 1 (im Rahmen dieser Anmeldung als Zustands-Modell ZM bezeichnet) um die genannten Störgrößenmodelle erweitert, sodass die Störgrößen w_l als weitere Zustandsgrößen x_i im erweiterten Zustands-Modell ZM berücksichtigt werden. Ein mathematisches Zustands-Modell ZM eines technischen Systems 1 kann bekanntermaßen als Zustands-Modell ZM in Form einer vektorwertigen Zustandsdifferentialgleichung oder Zustandsdifferenzengleichung gegeben sein, das typischerweise die zeitliche Änderung des Zustandsvektors $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \ldots, x_n]^T$ beschreibt (im Fall einer Erweiterung um ein Störgrößenmodell zeitliche Änderung eines erweiterten Zustandsvektors $\mathbf{X^+} = [x_1, x_2, \ldots, x_n, w_1, w_2, \ldots, w_p]^T$). Eine vektorwertige zeitdiskrete Differenzengleichung sowie eine vektorwertige zeitkontinuierliche Differentialgleichung können als lineare oder als nichtlineare Gleichungen gegeben sein.

Bekannte Ansätze nach Stand der Technik sehen hierfür vor, für ein derart erweitertes Zustands-Modell ZM einen Zustandsbeobachter ZB zu entwerfen, der für die Zustandsgrößen $x_1, x_2, \ldots, x_n$ sowie für die Störgrößen $w_1, w_2, \ldots, w_p$ Schätzwerte ermittelt. Auf diese Weise ermittelte Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{w}_1, \widehat{w}_2, \ldots, \widehat{w}_p$ können nachfolgend in einem Regler R zur Störgrößenkompensation herangezogen werden, beispielsweise indem die Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{w}_1, \widehat{w}_2, \ldots, \widehat{w}_p$ einer aus einem Regelgesetz ohne Kompensation hervorgehenden Stellgröße überlagert werden, beispielsweise durch Addition oder Subtraktion oder gewichtete Addition oder gewichtete Subtraktion der Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{w}_1, \widehat{w}_2, \widehat{w}_3$. Vor einer derartigen Überlagerung können die Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{w}_1, \widehat{w}_2, \widehat{w}_3$ auch einer Filterung unterzogen werden.

Hierbei ist man in der Praxis vielfach mit dem Fall konfrontiert, dass Störgrößen w_l in einem entscheidenden Maß das zeitliche Verhalten bzw. die zeitliche Veränderung einer zu regelnden Ausgangsgröße y beeinflussen. Insbesondere wenn eine auf diese Weise gestörte Ausgangsgröße y in dynamischer Wechselwirkung mit den Zustandsgrößen eines technischen Systems 1 steht, ergibt sich oftmals die Fragestellung, wie ein geeignetes mathematisches Modell für die gegebene Ausgangsgrößen y angegeben werden kann. Auch für die Regelung der Ausgangsgröße y ist eine akkurate Beschreibung der Ausgangsgröße y üblicherweise erforderlich. Damit ergibt sich in vielen Fällen eine Kombination von zwei Problemstellungen: Einerseits die Notwendigkeit eine Störgröße w_l an sich zu schätzen,

andererseits die Fragestellung, wie die Dynamik, also das zeitliche Verhalten, einer in einem wesentlichen Maß von dieser Störgröße w_l beeinflussten Ausgangsgröße y modelliert werden kann, weil ein Modell der Ausgangsgröße y für die Regelung der Ausgangsgröße y erforderlich ist. Der Stand der Technik bietet keine Ansätze zur Lösung dieser Problemstellungen, im Gegensatz zur gegenständlichen Erfindung, die zu diesem Zweck herangezogen werden kann.

Konkret ist erfindungsgemäß in einem ersten Schritt vorgesehen, ein mathematisches Zustands-Modell ZM, welches das zeitliche Verhalten von Zustandsgrößen x_i beschreibt, um ein Ausgangsgrößenmodell AM, welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße w_l beeinflussten Ausgangsgröße y beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell AZM zu erweitern. Im Gegensatz zu aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren, bei denen ein Zustands-Modell ZM, wie erwähnt, um Störgrößenmodelle erweitert wird, wird im Rahmen der Erfindung das Zustands-Modell ZM um ein Modell der Ausgangsgröße y ergänzt. Erfindungsgemäß weist das Ausgangsgrößenmodell AM einen von der Ausgangsgröße y abhängenden Dynamik-Anteil AM1 und einen von der Ausgangsstörung w_l abhängenden Fehler-Anteil AM2 auf.

Ausgehend vom beschriebenen Ausgangs-Zustands-Modell AZM ist erfindungsgemäß in einem weiteren Schritt vorgesehen, während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells AZM entworfenen Zustandsbeobachters ZB einen aktuellen Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ für die zumindest eine Störgröße w_l zu ermitteln und diesen dem Regler R zuzuführen, sodass es dem Regler R möglich wird, den Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße v zu berücksichtigen. Für den Entwurf des Zustandsbeobachters ZB kann vorgegangen werden, wie anhand der Methoden aus dem Stand der Technik beschrieben. Entscheidend ist, dass erfindungsgemäß ein Modell der zu regelnden Ausgangsgröße y eingebunden wird.

Durch die Erfindung wird es möglich, die genannten Problemstellungen kombiniert zu lösen: Einerseits wird ein Modell der Ausgangsgröße y angegeben, andererseits wird die zumindest eine Störgröße im Ausgangs-Zustands-Modell berücksichtigt. In einer vorteilhaften Weise kann dieser Aspekt umgesetzt werden, indem im Ausgangsmodell der Dynamik-Anteil AM1 als ausschließlich von der Ausgangsgröße y abhängend ausgestaltet wird, und der Fehler-Anteil AM2 als ausschließlich von der zumindest einen Störgröße w_l abhängend ausgestaltet wird.

Eine auf den vorstehenden Ausführungen aufbauende, besonders vorteilhafte Ausgestaltung der gegenständlichen Erfindung ist in Fig.2 dargestellt. Konkret zeigt Fig.2 ein Blockschaltbild eines Regelkreises 100 mit einem Zustandsbeobachter ZB und einem vom Zustandsbeobachter ZB separaten Störgrößenbeobachter SB. Im in Fig.2 gezeigten Fall

bilden der Störgrößenbeobachter SB und der Zustandsbeobachter ZB eine Kaskadenstruktur. Die Schätzung der zumindest einen Störgröße w_l wird dabei in zwei Teilaufgaben aufgeteilt, einerseits in eine Schätzung von Zustandsgrößen x_i, die durch den Zustandsbeobachter ZB erfolgt, andererseits in die Schätzung der Störgröße w_l auf Basis der geschätzten Zustandsgrößen x_i, was mittels des genannten Störgrößenbeobachters SB erfolgt. Der Zustandsbeobachter ZB und der Störgrößenbeobachter SB werden dabei auf Basis des erfindungsgemäßen Ausgangs-Zustands-Modells AZM entworfen.

Auf dieses Weise muss der Zustandsbeobachter ZB in Fällen, in denen auch Zustands-Schätzwerte zu ermitteln sind, nicht zusätzlich auch noch Störgrößen schätzen. Es ist anzumerken, dass ein Zustandsbeobachter ZB hierbei sämtliche Zustandsgrößen x_i des technischen Systems 1 schätzen kann, oder auch nur ausgewählte Zustandsgrößen x_i des technischen Systems 1 schätzen kann, oder auch nur eine einzelne Zustandsgrößen x_i des technischen Systems 1 schätzen kann. In unterschiedlichen Anwendungsfällen können sich hier unterschiedliche Anforderungen ergeben. Selbiges gilt für die Störgrößen w_l, wo in einem Störgrößenbeobachter SB sämtliche Störgrößen w_l geschätzt werden können, oder nur ausgewählte. Jedenfalls wird jedoch die die Ausgangsgröße y beeinflussende Störgröße w_2 geschätzt. Konkret ist der Störgrößenbeobachter SB in der in Fig.2 gezeigten Ausgestaltung im Anschluss an den Zustandsbeobachter ZB angeordnet, sodass der Zustandsbeobachter ZB lediglich Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_n]^T$, die aufgrund der Erweiterung um das Ausgangs-Zustands-Modells AZM aber eine Ausgangsgröße des technischen Systems 1 mitumfassen können, zu ermitteln und als Ausgangsgrößen des Zustandsbeobachters ZB auszugeben braucht, der Störgrößenbeobachter SB demgegenüber lediglich Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{W}} = \left[\hat{w}_1, \hat{w}_2, \ldots, \hat{w}_p\right]^T$ bestimmen muss. Die zu Fig.1 vorgebrachten Ausführungen bezüglich Störgrößen w_1, w_2, w_3, …, w_p Zustandsgrößen x_1, ..., x_n, Eingangsgröße u, Ausgangsgröße y, Regler R, Stellgröße v, vektorieller Notation, Messung usw. sind hinsichtlich des in Fig.2 gezeigten Koppelplanes unverändert gültig.

Im Rahmen des in Fig.2 gezeigten Koppelplanes ist konkret vorgesehen, zunächst während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels des, auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells AZM entworfenen Zustandsbeobachters ZB für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen x_i der n Zustandsgrößen x_i des technischen Systems 1 aktuelle Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}}_k = \left[\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \ldots, \hat{x}_{m,k}\right]^T$ zu ermitteln.

In einem weiteren Schritt, ebenfalls während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k, werden mittels des Störgrößenbeobachters SB aus den aktuellen zumindest m ermittelten Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_k = \left[\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \ldots, \hat{x}_{m,k}\right]^T$, aus einem aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ und/oder aus zumindest einem vergangenen Regelfehler $e_{y,k-j}$, aus bekannten zumindest m

vergangenen Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_{k-j} = \left[\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \ldots, \hat{x}_{m,k-j}\right]^T$ von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j}, und, falls m kleiner als p ist, aus zumindest einer Anzahl von p-m aktuellen Messwerten der Eingangsgröße u und/oder der Ausgangsgröße y und/oder von Zustandsgrößen $x_1 \ldots x_n$, für welche vom Zustandsbeobachter ZB kein Zustands-Schätzwert $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \ldots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt worden ist, aktuelle Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{W}}_{\boldsymbol{k}} = \left[\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \ldots, \hat{w}_{p,k}\right]^T$ für die p Störgrößen w_l ermittelt.

Hierbei wurde erkannt, dass es beispielsweise zur Bildung eines Gleichungssystems, aus welchem in weiterer Folge p Störgrößenschätzwerte für p Störgrößen w_l ermittelbar sind, ausreicht, dem Störgrößenbeobachter SB lediglich p Größen zur Verfügung zu stellen, wie insbesondere p Zustands-Schätzwerte $\hat{X}_k = \left[\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \ldots, \hat{x}_{p,k}\right]^T$, die der Zustandsbeobachter ZB zuvor ermittelt hat und aus denen der Störgrößenbeobachter SB die Störgrößen-Schätzwerte ermittelt (in diesem Fall gilt m=p).

Im Rahmen der Erfindung wurde jedoch erkannt, dass es möglich ist, mittels des Zustandsbeobachters ZB auch weniger als p Zustands-Schätzwerte zu ermitteln, sodass m kleiner als p ist. Um dem Störgrößenbeobachter SB auch in diesem Fall p Eingangsgrößen zur Verfügung stellen zu können, können dem Störgrößenbeobachter SB anstelle der in diesem Fall fehlenden p-m Zustands-Schätzwerte p-m Messwerte der Eingangsgröße u und/oder der Ausgangsgröße y und/oder von Zustandsgrößen $x_1 \ldots x_n$, für welche vom Zustandsbeobachter ZB kein Zustands-Schätzwert $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \ldots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt worden ist, zugeführt werden. Es können aber natürlich auch Schätzwerte für alle n Zustandsgrößen ermittelt werden und dem Störgrößenbeobachter SB zugeführt werden, sodass der Störgrößenbeobachter SB auf eine vollständige Schätzung des Zustands des technischen Systems 1 zugreifen kann. Im Rahmen der Erfindung wurde in diesem Zusammenhang erkannt, dass gute Ergebnisse insbesondere in Fällen erzielt werden können, in denen Schätzwerte für alle n Zustandsgrößen ermittelt werden und sämtliche dieser n Schätzwerte dem Störgrößenbeobachter SB zugeführt werden. Ebenso kann dem Störgrößenbeobachter SB aber auch eine Kombination aus Zustands-Schätzwerten und Messwerten zugeführt werden, die insgesamt mehr als p Größen ausmacht, z.B. p Zustands-Schätzwerte und n-p Messwerte.

Wird, wie eingangs beschrieben, lediglich eine einzelne Störgröße w_l geschätzt, die das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße y beeinflusst, ist es demnach bereits ausreichend, lediglich für eine Zustandsgröße xi einen Schätzwert $\hat{x}_i$ zu ermitteln.

Ebenso sei angemerkt, dass der vergangene Regelfehler $e_{y,k-j}$ und die bekannten zumindest m Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_{k-j} = \left[\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \ldots, \hat{x}_{m,k-j}\right]^T$ zwar vorzugsweise von einem gemeinsamen vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} stammen, dies aber keine zwingende

Voraussetzung der Erfindung darstellet. Ebenso kann z.B. der Regelfehler $e_{y,k-j}$ von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} stammen, die bekannten zumindest m Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_{k-o} = \left[\hat{x}_{1,k-o}, \hat{x}_{2,k-o}, \ldots, \hat{x}_{m,k-o}\right]^T$ jedoch von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-o}.

Daran anschließend ist im Rahmen der anhand Fig.2 gezeigten Ausgestaltung vorgesehen, die ermittelten Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{W}}_{\boldsymbol{k}} = \left[\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \ldots, \hat{w}_{p,k}\right]^T$ dem Regler R zuzuführen, sodass der Regler R die Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{W}}_{\boldsymbol{k}} = \left[\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \ldots, \hat{w}_{p,k}\right]^T$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße v_k berücksichtigen kann.

In einer vorteilhaften Weise kann dabei ein dem aktuellen Regelungs-Zeitschritt t_k unmittelbar vorhergehender Regelungs-Zeitschritt t_{k-1} als vergangener Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} verwendet werden, also j=1, von welchem die zur Ermittlung der des den Störgrößen-Schätzwertes $\hat{w}_{j,k}$ herangezogenen bekannten Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k-1}, \hat{x}_{2,k-1}, \ldots, \hat{x}_{n,k-1}$ stammen.

Dieser Vorgehensweise liegen mehrere Erkenntnisse zu Grunde. So ist eine Kernidee des beschriebenen Verfahrens, zuerst anhand eines Zustandsbeobachters ZB und ohne explizite Berücksichtigung der wirkenden Störgrößen w_l korrekte Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}}_k$ zu generieren. Die ermittelten Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_k$ werden gemeinsam mit bekannten, vergangenen zumindest m Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_{k-j}$ zur Ermittlung der Störgrößen-Schätzwerte herangezogen.

Vorzugsweise können im Störgrößenbeobachter SB dabei aufeinanderfolgende Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}}_k, \widehat{\boldsymbol{X}}_{k-1}$ miteinander verglichen werden, wobei geprüft wird, ob der Zusammenhang zwischen den verglichenen, aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten $\widehat{\boldsymbol{X}}_k, \widehat{\boldsymbol{X}}_{k-1}$ einem störungsfreien Zusammenhang entspricht, der sich in einem störungsfreien Szenario einstellen würde und z.B. durch das Ausgangs-Zustands-Modell AZM ohne Störungen gegeben ist, oder ob eine Abweichung zu diesem störungsfreien Zusammenhang existiert. Hängen zwei aufeinanderfolge Zustandsvektoren $\mathbf{X}_k$, $\mathbf{X}_{k-1}$ eines technischen Systems 1 im ungestörten Fall beispielsweise durch eine allgemeine Differenzengleichung der Form $\mathbf{X}_k = \mathbf{g}(\mathbf{X}_{k-1}, u_{k-1})$ zusammen, im gestörten jedoch durch eine Differenzengleichung der Form $\mathbf{X}_k = \mathbf{g}(\mathbf{X}_{k-1}, u_{k-1}) + \mathbf{H}w_{k-1}$, jeweils mit rein beispielhaften, von durch das technische System 1 bzw. durch die Modellierung des technischen Systems 1 vorgegebenen Funktion **g** und Matrix **H**, kann im einfachsten Fall einfach eine Differenz $\mathbf{H}w_k = \mathbf{X}_{k+1} - \mathbf{g}(\mathbf{X}_k, u_k)$ zur Bestimmung dieser Abweichung gebildet werden. Im Rahmen der Erfindung wurde erkannt, dass eine derartige Abweichung ein Maß für Störgrößen w_l darstellen kann, und dass die gesuchten Störgrößen aus einer solchen Abweichung ermittelt werden können. Auf diese Weise wird es möglich, in einem ersten Schritt auch ohne näheres Wissen über das

dynamische Verhalten der zu schätzenden Störgrößen präzise Störgrößen-Schätzwerte zu ermitteln.

Eine weitere, zentrale Einsicht der Erfindung ist es, Regelfehler e_y als zusätzliche Korrekturterme im Störgrößenbeobachter SB zu verwenden. Beispielsweise können die genannten Regelfehler e_y, bevorzugt durch einen linearen Gewichtungsfaktor $\bar{L}$ gewichtet, bei der Berechnung der Störgrößen-Schätzwerte berücksichtigt werden. Hier wurde erkannt, dass Regelfehler e_y ein weiteres Maß für die zu schätzenden Störgrößen w darstellen, insbesondere da bei einem durch einen geeignet ausgelegten Regler R geregelten technischen System 1 im ungestörten Fall vielfach keine oder nur unwesentliche Regelfehler e_y auftreten. Kompakt formuliert können diese Überlegungen exemplarisch durch die rein beispielhafte Rechenvorschrift

$$\widehat{\boldsymbol{W}}_k = \boldsymbol{H}^+ \left(\widehat{\boldsymbol{X}}_{k+1} - \boldsymbol{g}\left(\widehat{\boldsymbol{X}}_{k-j}, \boldsymbol{u}_k \right) \right) + \bar{\boldsymbol{L}} e_{y,k}$$

zusammengefasst werden, die z.B. im Störgrößenbeobachter vorgesehen sein kann. Die Parameter **g**, $\mathbf{H}^+$ leiten sich dabei von den obigen beispielhaften Differenzengleichungen ab, sodass $\mathbf{H}^+$ eine Inverse oder eine Pseudo-Inverse oder eine andere invertierende Funktion einer die Störgröße $\mathbf{W}_k$ gewichtenden Matrix **H** ist. Insbesondere die Verwendung zumindest eines Regelfehlers e_y als Korrekturterm bringt teils signifikante Vorteile bezüglich der erreichbaren Konvergenzzeiten und der erzielbaren Robustheit des Störgrößenbeobachter SB.

Hierbei sei angemerkt, dass die m Zustands-Schätzwerte $\widehat{\boldsymbol{X}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \ldots, \hat{x}_m]^T$ nicht den ersten m Zustandsvariablen $x_1,\ldots,x_m$ entsprechen müssen, sondern beliebig ausgewählte m Zustandsvariablen $x_1,\ldots,x_m$ der insgesamt n Zustandsvariablen $x_1,\ldots,x_n$ sein können. Dieser Umstand ermöglicht es, insbesondere die Komplexität von Zustandsbeobachtern ZB mitunter signifikant zu reduzieren. Es kann damit z.B. auch bei einem komplexen System 1 mit einer Vielzahl an Zustandsgrößen x_i ausreichend sein, lediglich eine Zustandsgröße x_i zu schätzen, wenn z.B. lediglich eine Störgröße w_l wirkt.

Regelkreise 100 wie die in Fig.1 und Fig.2 gezeigten eignen sich insbesondere zur Regelung von bidirektionalen DC/DC-Wandlern 10 als technisches System 1, wie sie z.B. auf HiL-Prüfständen, z.B. zur Entwicklung und Testung von Batteriesystemen, insbesondere Batteriesystemen von elektrischen Antriebssträngen, eingesetzt werden. Dazu ist anzumerken, dass die Erfindung trotz der sich hierbei ergebenden Vorteile natürlich nicht auf die Regelung eines bidirektionalen DC/DC-Wandlers 10 als technisches System 1 wie in Fig.3 gezeigt beschränkt ist, sondern auch auf andere technischen Systeme 1 angewandt werden kann. Auch die nachfolgend angegebenen und mit dem diskutierten DC/DC-Wandler

10 einhergehenden mathematischen Modelle und Beschreibungen sind als rein beispielgebend zu betrachten und dienen nur der Erläuterung der Erfindung.

Fig.3 offenbart eine mögliche Ausgestaltung eines technischen Systems 1 in Form eines DC/DC-Wandlers 10 mit einer elektrischen Last 5. Der DC/DC-Wandler 10 nimmt dabei die Rolle des technischen Systems 1 ein. Die elektrische Last 5 steht stellvertretend für einen zu testenden Prüfling (auch „Unit Under Test" bzw. „UUT"), wobei nachfolgend der Fall einer elektrischen Last 5 in Form eines Batteriesystems betrachtet wird. Die elektrische Last 5 kann aber ebenso ein (zumindest teilweise) elektrischer Antriebsstrang eines Fahrzeugs sein, oder bestimmte Antriebsstrangkomponenten eines elektrischen Antriebsstranges umfassen, oder auch nur eine einzelne Antriebsstrangkomponente eines elektrischen Antriebsstranges darstellen, wie einen Stromrichter oder eine elektrische Maschine. Der DC/DC-Wandler 10 stellt der elektrischen Last 5 einen Laststrom i_L zur Verfügung, woraus sich in Zusammenwirkung mit der Last 5 eine Lastspannung v_2 am Ausgang des DC/DC-Wandlers 10 einstellt.

Der in Fig.3 gezeigte DC/DC-Wandler 10 umfasst die Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4. An den Eingängen E_1, E_2 des DC/DC-Wandlers 10 liegt eine Gleichspannung v_0 an, welche von einem üblicherweise vorhandenen Glättungskondensator C_0 geglättet wird. Zur Erzeugung der Gleichspannung v_0 wird eine dreiphasige Wechselspannung AC mittels eines Gleichrichters 4 zu einer Eingangs-Gleichspannung v_0 gleichgerichtet.

Im in Fig.3 gezeigten Ausführungsbeispiel ist der DC/DC-Wandler 10 als vierstrangiger Synchronwandler aufgebaut. Der DC/DC-Wandler 10 kann aber auch mehr oder auch weniger Stränge aufweisen. Die Anwendbarkeit der gegenständlichen Erfindung wird dadurch nicht eingeschränkt. Der DC/DC-Wandler 10 besteht aus parallelen Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 und zugehörigen Drosseln L_1, L_2, L_3, L_4, deren Strangströme i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4} jeweils durch das Schaltverhalten der zugehörigen Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 gesteuert werden. Die Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 bestehen aus je einem oberen Leistungsschalter S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4}, sowie aus je einem unteren Leistungsschalter S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4}, wobei die Stränge mit den zugehörigen Drosseln, L_1, L_2, L_3, L_4 jeweils zwischen einem oberen und unteren Leistungsschalter geschaltet sind. Weiters sind wie üblich parallel zu den Leistungsschaltern zugehörige Freilaufdioden D_{o1}, D_{u1}, D_{o2}, D_{u2}, D_{o3}, D_{u3}, D_{o4}, D_{u4} vorgesehen.

Pro Strang sind somit je eine Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 und je eine Drossel L_1, L_2, L_3, L_4 vorgesehen, wobei die Drosseln L_1, L_2, L_3, L_4 einerseits zwischen den oberen Leistungsschaltern S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4} und unteren Leistungsschaltern S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4} mit je einer Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 verbunden sind, und andererseits ausgangsseitig miteinander verbunden sind. Damit ergibt sich der Ausgangsstrom i_1 als Summe der

jeweiligen Strangströme i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}, i_{L4}. Ohm'sche Widerstände der Drosseln L_1, L_2, L_3, L_4 sind in Fig.3 vernachlässigt, können aber (wie später in Fig.4) ebenso berücksichtigt werden.

Zudem ist üblicherweise ein Ausgangsfilter F vorgesehen, das den Ausgangsstrom i_1 in gewünschter Weise filtert, beispielsweise glättet. Das Ausgangsfilter F ist im Ausführungsbeispiel nach Fig.3 in Form eines ausgangsseitigen Glättungskondensators C_2 und einer Ausgangsinduktivität L ausgebildet. Das Ausgangsfilter F erhält einen Ausgangsstrom i_1 des DC/DC-Wandlers 10 bzw. eine Ausgangsspannung v_1 als Eingangsgröße(n) und filtert diese.

Die Leistungsschalter S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4}, S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4} der Halbbrücken werden durch eine Steuereinheit 2 angesteuert. Mögliche Realisierungen einer Steuereinheit 2 sind unter anderem durch mikroprozessorbasierte Hardware, wie beispielsweise Mikrocontroller, und integrierte Schaltungen (ASIC, FPGA) gegeben. In der Folge wird davon ausgegangen, dass die Steuereinheit 2 mit einer Abtastzeit T_s getaktet ist, sodass sich, wie erwähnt, diskrete Regelungs-Zeitschritte $t_k = k \cdot T_s$ ausbilden, wobei k typischerweise aus der Menge der natürlichen oder ganzen Zahlen stammt. Auf einer Steuereinheit 2 kann die erfindungsgemäße Beobachtung und Regelung umgesetzt werden. Natürlich sind typischerweise auch bei anderen technischen Systemen 1 entsprechende Steuereinheiten 2 vorgesehen, nicht nur beim gegenständlich betrachteten DC/DC-Wandler 10.

Die oberen Leistungsschalter S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4} und die jeweils zugehörigen unteren Leistungsschalter S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4} einer Halbbrücke HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 werden grundlegend alternierend geschaltet, um potentiell beschädigende Kurzschlüsse in den Halbbrücken zu verhindern. Zur konkreten Ansteuerung der Leistungsschalter S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4}, S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4} ist in der Steuereinheit 2 ein Steuerverfahren implementiert, üblicherweise eine hinlänglich bekannte Pulsweitenmodulation (PWM). Mittels einer Pulsweitenmodulation kann bekanntermaßen ein Tastgrad d (englisch „duty cycle") vorgegeben werden, welcher die Dauer des Durchschaltens der Eingangsspannung v_0 über eine Halbbrücke in Relation zu einer vorgegebenen Schaltperiode T_s beschreibt. Der Kehrwert der Schaltperiode T_s legt dabei die Schaltfrequenz $f_S = \frac{1}{T_S}$ fest.

Die Steuerung von Halbbrücken HB_1, HB_2, HB_3, HB_4 sowie das Prinzip einer PWM sind in der Leistungselektronik hinreichend bekannt, weswegen auf diese Punkte an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Es sei angemerkt, dass zur Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens auch andere Ansteuerverfahren verwendet werden können, wie z.B. eine Pulse-Frequency-Modulation (PFM).

Der DC/DC-Wandler 10 kann selbstverständlich auch in einer anderen Ausführung oder Schaltungstopologie, z.B. mit weniger oder mehr Strängen, mit weniger oder mehr

Leistungsschaltern (auch pro Halbbrücke), etc. ausgeführt sein. Ebenso ist es denkbar, dass der Gleichrichter 4 im DC/DC-Wandler 10 integriert ist. In jeder Ausführung umfasst der DC/DC-Wandler 10 jedoch zumindest einen Leistungsschalter, der von einer Steuereinheit 2 angesteuert wird, um einen Laststrom i_L oder eine Lastspannung v_2 einzustellen.

Zum Betrieb des DC/DC-Wandlers 10 kann vorgesehen sein, den Laststrom i_L und/oder die Lastspannung v_2, z.B. messtechnisch oder rechnerisch oder durch einen Beobachter anhand anderer bekannter Größen, zu ermitteln, und den ermittelten Laststrom i_L und/oder die Lastspannung v_2 der Steuereinheit 2 zuzuführen, wie im Ausführungsbeispiel der Fig.3. Dazu ist anzumerken, dass sich in der Praxis insbesondere die Messung der Lastspannung v_2 als oftmals schwierig erweist, und aufgrund der üblicherweise nötigen Verkabelung von zur Messung eingesetzten Messaufbauten das tatsächliche zeitliche Verhalten einer Lastspannung v_2 oft nur unzureichend in einer Messung abgebildet werden kann. Weiters ist in der Steuereinheit 2 ein Emulationsmodell 3 einer zu emulierenden Komponente (UUT) vorgesehen, beispielsweise ein Antriebsstrangmodell zur Beschreibung des zeitlichen Verhaltens eines elektrischen Antriebsstranges oder ein Batteriemodell.

Das Emulationsmodell 3 bildet das Verhalten der nachzubildenden Komponente(n) nach und berechnet typischerweise eine Referenzgröße r, z.B. in Form eines Referenzstromes i_R (Batteriestrom) oder einer Referenzspannung u_R. Eine derartige Referenzspannung u_R kann in weiterer Folge als Referenzgröße r bzw. als Referenzgrößen-Zeitverlauf zur Regelung der Lastspannung v_2 herangezogen werden. Die Vorgabe einer Referenzgröße r kann aber auch anderweitig erfolgen, z.B. durch die Vorgabe eines Bedieners oder durch ein Auslesen aus einer Tabelle. In diesem Fall ist kein Emulationsmodell 3 nötig. Auch muss ein Emulationsmodell 3 nicht zwingend Eingangsgrößen aufnehmen, sondern kann eine Referenzgröße r auch ohne von extern vorgegebene Eingangsgrößen ermitteln.

Um in weiterer Folge darzulegen, wie das erfindungsgemäße Verfahren auf einen wie anhand Fig.3 beschriebenen DC/DC Wandler 10 angewandt werden kann, wird in einem ersten Schritt gezeigt, wie mittels des in Fig.4 gezeigten Ersatzschaltbildes des DC/DC Wandlers 10 ein mathematisches Modell für den DC/DC Wandler 10 angegeben werden kann.

In Fig.4 stehen L_i, R_i für die Durchschnitte der Induktivitäten der Drosseln L_1, L_2, L_3, L_4 sowie für einen internen Widerstand dieser Durchschnitts-Induktivität L_i, C_2 wie vorhin vor für einen ausgangsseitigen Glättungskondensators, L ebenso wie vorhin für die bereits erwähnte Ausgangsinduktivität L, und R_o für einen zur Ausgangsinduktivität L zugehörigen internen Widerstand. Weiters wirkt eine Störgröße w_2, die im gegenständlichen Fall in Form eines Stromes, der durch die Last 5 vorgegeben wird, gegeben sein kann, oder durch einen Modellfehler in der Beschreibung der Dynamik, also des zeitlichen Verhaltens, der

Ausgangsgröße y, oder durch andere Störeinflüsse, was durch eine Störgröße w_2 abgebildet werden kann. Insbesondere wenn die Dynamik der zu regelnden Ausgangsgröße y gänzlich unbekannt ist, bietet sich eine Darstellung wie die anhand Fig.4 beschriebene, basierend auf einer Störgröße w_2, oftmals als effektive Möglichkeit zur Modellierung an. Soll nun die Lastspannung v_2 als Ausgangsgröße y geregelt werden, tritt der besprochene Fall ein, dass das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße y einerseits in einem entscheidenden Maß von der Störgröße w_2 abhängig ist, und dass andererseits nicht klar ist, wie ein Modell für die Ausgangsgröße y angegeben werden soll, da das Verhalten der Last 5 bzw. der dargestellten Stromquelle typischerweise unbekannt ist, und dass die Ausgangsgröße in Form der Lastspannung v_2 auf die übrigen Zustandsgrößen x_i wirkt.

Ausgehend vom Ersatzschaltbild aus Fig.4 kann dazu zunächst folgendes System aus drei Differentialgleichungen als mathematische Zustands-Modell ZM für den in Fig.3 gezeigten DC/DC-Wandler 10 abgeleitet werden:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_i}{L_i} & \frac{-1}{L_i} & 0 \\ \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R_o}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \underbrace{v_0 \cdot d}_{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{L} \end{bmatrix} v_2$$

$$y = v_2$$

Darin stehen i_1, i_2, v_1, v_2 für die Summe der Phasenströme, den Ausgangsstrom, die Ausgangsspannung und die gemessene Lastspannung. $v_0 \cdot d$ steht für die Eingangsgröße u, die sich als Produkt der Zwischenkreisspannung v_0 und des Tastverhältnisses d ergibt. Bei dieser Wahl kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Stellgröße u und dem durchschnittlichen duty-cycle der PWM-Signale für die Leistungsschalter S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4}, S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4} hergestellt werden.

Um das mathematische Zustands-Modell ZM erfindungsgemäß um ein Ausgangsgrößenmodell AM, welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße w_2 beeinflussten Ausgangsgröße y beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell AZM zu erweitern, kann zunächst das folgende Ausgangsgrößenmodell AM für die Lastspannung v_2 angegeben werden:

$$\boldsymbol{AM}: \quad \frac{d}{dt} v_2 = \underbrace{q \cdot v_2}_{\boldsymbol{AM1}} + \underbrace{\gamma(v_0 \cdot d) + w_2}_{\boldsymbol{AM2}}$$

Dieses Ausgangsgrößenmodell AM weist einen von der Ausgangsgröße $y=v_2$ abhängenden Dynamik-Anteil AM1 und einen von der Ausgangsstörung w_2 abhängenden Fehler-Anteil AM2 auf. Wird der Parameter γ zu Null gewählt, also $\gamma=0$, kann die erwähnte vorteilhafte Ausgestaltung erreicht werden, in welcher der Dynamik-Anteil AM1 ausschließlich von der

Ausgangsgröße $y=v_2$ abhängt und der Fehler-Anteil AM2 ausschließlich von der zumindest einen Störgröße w_2 abhängt.

In das eingangs genannte Zustands-Modell ZM eingesetzt ergibt sich damit

$$\boldsymbol{AZM}: \quad \frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \\ v_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{-R_i}{L_i} & \frac{-1}{L_i} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R_o}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & q \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \\ v_2 \end{pmatrix}}_{\boldsymbol{X}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \\ \gamma \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{B}} \underbrace{v_0 \cdot d}_{u} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\boldsymbol{E}} w_2$$

als erfindungsgemäßes Ausgangs-Zustands-Modell AZM zur Beschreibung des DC/DC-Wandlers 10. Zur kompakteren Schreibweise werden für den (nun erweiterten) Zustandsvektor, die Dynamikmatrix, den Eingangsvektor, den Stör-Eingangsvektor und den Ausgangsvektor die in der linearen Regelungstechnik üblichen Abkürzungen **X**, **A**, **B**, **E**, **C** eingeführt. Mit dem gegenständlichen Ausgangs-Zustands-Modell AZM kann nun, wie bereits eingehend diskutiert, ein Zustandsbeobachters ZB zur Schätzung des Zustandsvektors **X** angegeben werden, wozu verschiedenste in der Regelungstechnik bekannte Ansätze herangezogen werden können (Kalman-Filter, Luenberger-Beobachter, usw.).

Um weiters die ebenfalls bereits erläuterte, besonders vorteilhafte Vorgehensweise basierend auf einer Kaskadenstruktur aus einem Störgrößenbeobachter SB und einem Zustandsbeobachter ZB umzusetzen, kann wie folgt vorgegangen werden:

Zunächst kann das angegebene Ausgangs-Zustands-Modell diskretisiert werden (z.B. mittels eines Forward- oder Backward-Euler-Verfahrens oder mittels der Methode nach Tustin), woraus sich ein allgemeines, diskretes Ausgangs-Zustands-Modell folgender Form ergibt:

$$\boldsymbol{X}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d \boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_d u_k + \boldsymbol{E}_d w_{2,k}.$$

Der Subskript d repräsentiert darin die zeitdiskrete Modellbeschreibung, und der Index k notiert die bereits erwähnten zeitdiskreten Regelungs-Zeitschritte. An dieser Stelle sei erneut angemerkt, dass die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens keineswegs auf die Regelung eines DC/DC Wandlers 10 eingeschränkt ist. Ein System wie die obenstehende lineare Differenzengleichung kann aus der Modellierung der unterschiedlichsten technischen Systeme 1 hervorgehen, was auf die universelle Einsetzbarkeit der Erfindung hinweist. Insbesondere kann sich ein obiges, lineares, zeitdiskretes Modell auch aus der Linearisierung eines beliebigen nichtlinearen Modells ergeben, sodass die Klasse von Modellen bzw. technischen Systemen 1, auf die die Erfindung angewandt werden kann, im Grunde nicht eingeschränkt werden muss.

Um die Ausgangsgröße $y=v_2$ auf eine vorgegebene oder eine durch ein Emulationsmodell ermittelte Referenzgröße r einzuregeln, kann für das obige Modell ein nichtlineares oder auch ein lineares Regelungsgesetz vorgegeben werden, z.B. in Form eines in der Regelungstechnik hinlänglich bekannten Zustandsreglers, bei welchem der Zustandsvektor **X** des zu regelnden Systems mittels einer Regler-Verstärkung $\mathbf{K_x}$ direkt auf die Stellgröße u abgebildet wird. Zur Wahl der Regler-Verstärkung $\mathbf{K_x}$ stehen eine Vielzahl von Methoden und Ansätze zur Verfügung, wie der Zustandsregler-Entwurf nach Ackermann.

In einer vorteilhaften Weise kann als Regler R aber auch ein sogenannter Optimalregler verwendet werden, welcher in den vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten bei der Ermittlung der Stellgröße v ein vorgegebenes Gütemaß J, welches vorzugsweise eine Zeitdauer bis zur Einregelung der Ausgangsgröße y auf die Referenzgröße r und/oder eine im Zuge der Regelung aufzuwendende Stellenergie und/oder einen zeitlichen Verlauf eines Regelfehlers $e_y=r-y$ bewertet, optimiert.

Wie erwähnt, werden die ermittelten Störgrößen-Schätzwerte vorteilhafterweise im Regler R bei der Ermittlung der Stellgröße berücksichtigt. Hierzu sei angemerkt, dass diese Vorgehensweise insbesondere die Möglichkeit eröffnet, Regelgesetze ohne Integralanteile zu verwenden. Integrierende Regler werden typischerweise herangezogen, um Eingangsstörungen zu unterdrücken. Werden, wie im Rahmen der Erfindung vorgesehen, allerdings sämtliche wirkenden Störgrößen geschätzt und mittels ihrer Schätzung berücksichtigt und in geeigneter Weise kompensiert, kann auf Integratoren im Regler R vielfach verzichtet werden, was hinsichtlich Dynamik und Schwingneigung der resultierenden Regelkreise vielfältige Vorteile mit sich bringt (beispielsweise können Integratoren in Reglern R größere Ripple und größeres Überschwingen in Sprungantworten verursachen).

Wird nun beispielhaft ein Zustandsregler $\mathbf{K_x}$ zum Einregeln einer Ausgangsgröße y auf eine vorgegebene Referenzgröße r eingesetzt, kann im gegenständlichen Fall z.B. das Bildungsgesetz

$$u_k = \boldsymbol{K_x}\left(\widehat{\boldsymbol{X}}_k - \boldsymbol{X}_r\right) + u_r$$

für die Stellgröße u_k angegeben werden, wobei sich die Größe $\boldsymbol{X}_r$ gemäß der Gleichung

$$r = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}_r$$

aus der vorgegebenen Referenzgröße r ableitet, und damit einen Referenz-Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ darstellt, und u_r einen Wert der Stellgröße u_k darstellt, der erforderlich ist, um den Zustandsvektor **X** im Referenz-Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ zu halten. Der regelungstechnischen Literatur kann für ein allgemeines, lineares System der Form $\boldsymbol{X}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_d u_k + \boldsymbol{E}_d w_{2,k}, y = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}$ beispielsweise die Rechenvorschrift $u_r = (\boldsymbol{C}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}_d)^{-1}\boldsymbol{B}_d)^{-1}\left(r -\right.$

$\boldsymbol{C}(I - \boldsymbol{A}_d)^{-1}\boldsymbol{E}_d\widehat{w}_{2,k}\big)$ entnommen werden, wo insbesondere die Berücksichtigung des Störgrößen-Schätzwertes $\widehat{w}_{2,k}$ klar ersichtlich wird.

Die Idee bei der Einführung dieses Referenzzustandsvektors $\mathbf{X}_r$ ist es, den Zustandsvektor **X** in einen Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ zu überführen, in dem das ursprünglich gestellte regelungstechnische Problem, die Ausgangsgröße y auf die Referenzgröße r einzuregeln, gelöst wird. Der Referenz-Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ ist damit eine Hilfsgröße, die sich aus der vorgegebenen Referenzgröße r ableitet.

Nachfolgend wird gezeigt, wie für obiges Modell ein Zustandsbeobachter ZB zur Ermittlung der Zustands-Schätzung $\widehat{\boldsymbol{X}}_k$ entworfen werden kann. Konkret können beispielsweise ausgehend vom oben angeführten zeitdiskreten Modell die folgenden Beobachtergleichungen für einen Zustandsbeobachter ZB angesetzt werden:

$$\boldsymbol{Z}_{k+1} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{Z}_{\boldsymbol{k}} + \boldsymbol{L}y_k + \boldsymbol{B}_d u_k$$

$$\widehat{\boldsymbol{X}}_k = \boldsymbol{Z}_k - \boldsymbol{M}y_k, \quad \hat{y}_k = \boldsymbol{D}\widehat{\boldsymbol{X}}_k$$

Darin steht $\boldsymbol{Z}_k$ für einen Hilfszustand, aus welchem gemäß der zweiten der obigen Gleichungen die Schätzung $\widehat{\boldsymbol{X}}_k$ für den zu schätzenden Zustandsvektor $\mathbf{X}_k$ ermittelt werden kann, und $\hat{y}_k$ für eine aus der Schätzung $\boldsymbol{X}_k$ ermittelte Schätzung der Ausgangsgröße y_k. Die Matrizen $\boldsymbol{N}, \boldsymbol{L}, \boldsymbol{G}, \boldsymbol{M}$ sind derart auszulegen, dass der Schätzfehler $\boldsymbol{e}_{x,k} = \boldsymbol{X}_k - \widehat{\boldsymbol{X}}_k$ konvergiert, also gegen $\boldsymbol{e}_{x,k} = \boldsymbol{0}$ strebt für einen gegen Unendlich strebenden Index k ($k \to \infty$). Die Matrix $\boldsymbol{D}$ kann hier der bereits bekannten Ausgangsmatrix C entsprechen, kann aber z.B. aus Gründen der Beobachterauslegung auch anders gewählt werden.

Es sei angemerkt, dass im gegenständlichen Fall, in dem lediglich eine Störung $w_{2,k}$ wirkt, der Zustandsbeobachter ZB ausgehend von der Ausgangsgröße y_k und der Eingangsgröße u_k des technischen Systems 1 die Zustands-Schätzwerte $\widehat{X}_k$ ermittelt. Diese Größen, Ausgangsgröße y_k und Eingangsgröße u_k, werden dem Zustandsbeobachter ZB in der praktischen Umsetzung als Messgrößen zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Erfindung wurde dahingehend erkannt, dass es in vielen für die Praxis relevanten Fällen erforderlich ist, einem Zustandsbeobachter ZB im Fall einer Anzahl von p wirkenden Störgrößen $w_1,...,w_p$ zumindest p Messgrößen, z.B. der Eingangsgröße u und/oder der Ausgangsgröße y und/oder von Zustandsgrößen $x_1...x_n$, zur Verfügung zu stellen, um den gewünschten Zustands-Schätzwert ermitteln zu können. In der regelungstechnischen Literatur spricht man hierbei von der „Existenz eines Beobachters“. Würden im gegenständlichen Fall beispielswiese zwei zusätzliche weitere Störgrößen w_1, w_3 wirken (insgesamt würden dann drei Störgrößen w_1, w_2, w_3 wirken), wäre es erforderlich, dem Zustandsbeobachter ZB eine weitere Messgröße zuzuführen, z.B. eine Messung einer Zustandsgröße x_i, sodass der

Zustandsbeobachter ausgehend von drei Messgrößen die gewünschte Schätzung durchführen kann.

Die Dynamik (d.h. das zeitliche Verhalten) des Schätzfehlers ist ausgehend von obigem Modell durch die Gleichung

$$\boldsymbol{e}_{x,k+1} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{e}_{x,k}$$

festgelegt, wodurch sich aus der Forderung eines konvergenten Schätzfehlers $\boldsymbol{e}_{x,k}$ unmittelbar eine Forderung nach einer Matrix **N**, die stabil ist im Sinne von Hurwitz ableiten lässt (bei diskreten Systemen: alle Eigenwerte der Matrix **N** innerhalb des Einheitskreises, bei kontinuierlichen Systemen: alle Eigenwerte der Matrix **N** in der linken offenen Halbebene der komplexen Zahlenebene). Im Rahmen der Erfindung wurde diesbezüglich erkannt, dass diese Forderung durch eine Matrix **N** erfüllt wird, welche der Gleichung

$$\boldsymbol{N} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{E}_d(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^+\boldsymbol{D})\boldsymbol{A}_d - [\boldsymbol{Q} \quad \boldsymbol{R}]\begin{bmatrix}\boldsymbol{D}\\ -\boldsymbol{D}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{E}_d(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^+\boldsymbol{D})\boldsymbol{A}_d\end{bmatrix}$$

entspricht. Ein derartiger Zustandsbeobachter kann für beliebe Systeme angegeben werden, die durch ein Modell der Form $\boldsymbol{X}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d\boldsymbol{X}_k + \boldsymbol{B}_d u_k + \boldsymbol{E}_d w_{2,k}$ modelliert werden können, und ist nicht auf den gegenständlich betrachteten DC/DC-Wandler beschränkt.

Darin stehen $\boldsymbol{I}$ für eine Einheitsmatrix geeigneter Dimension, $(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^+$ für die Pseudo-Inverse von $\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d$ $\left((\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^T(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)\right)^{-1}(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^T$ und $[\boldsymbol{Q} \quad \boldsymbol{R}]$ für Matrizen, die der Matrix **N** wie erwähnt Eigenwerte innerhalb des Einheitskreises aufprägen. Zur Wahl der Matrizen $[\boldsymbol{Q} \quad \boldsymbol{R}]$ sind verschiedene Ansätze aus der Literatur bekannt, in einer vorteilhaften Weise kann zu diesem Zweck beispielsweise die wohlbekannte Formel nach Ackermann eingesetzt werden. Für die Matrix **M** kann in ähnlicher Weise beispielsweise

$$\boldsymbol{M} = -\boldsymbol{E}_d(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^+ + \boldsymbol{R}(\boldsymbol{I} - (\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)(\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}_d)^+)$$

angesetzt werden. Es sei angemerkt, dass auch andere Ansätze zum Aufstellen der Beobachtergleichungen des Zustandsbeobachters ZB herangezogen werden können, wie Sliding-Mode-Beobachter, oder Kalman-Filter oder andere Beobachter. Entscheidend ist, dass es der Zustandsbeobachter ZB erlaubt, ohne explizite Betrachtung der Störgrößen w_2 eine exakte Schätzung des Zustandsvektors zu ermitteln, aus welcher in einem nächsten Schritt im Störgrößenbeobachter die gewünschten Störgrößen-Schätzwerte ermittelt werden können.

Wie diese Ermittlung von Störgrößen-Schätzwerten im gegenständlichen Anwendungsbeispiel konkret durchgeführt werden kann, wird nachfolgend dargestellt. Dazu sei zunächst eine naheliegende Herangehensweise gezeigt, bei der die Differenzengleichung für den Zustandsvektor ohne weitere Maßnahmen auf die zu schätzende Störgröße $\hat{w}_{2,k}$ aufgelöst wird:

$$\hat{w}_{2,k} = \boldsymbol{E}_d{}^{+}\left(\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1} - \boldsymbol{A}_d\hat{\boldsymbol{X}}_k - \boldsymbol{B}_d u_k\right).$$

Die Matrix $\boldsymbol{E}_d{}^{+}$ steht hierbei wie vorhin für die Pseudo-Inverse $\boldsymbol{E}_d{}^{+} = \left(\boldsymbol{E}_d{}^{T}\boldsymbol{E}_d\right)^{-1}\boldsymbol{E}_d{}^{T}$. Diese Vorgehensweise kann interpretiert werden als ein Vergleich eines neuen Schätzwertes $\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1}$ mit einer Prädiktion dieses neuen Schätzwertes, wobei diese Prädiktion basierend auf zumindest einem vorgehenden Schätzwert $\hat{\boldsymbol{X}}_k$ und einem störfreien Modell $\boldsymbol{A}_d\hat{\boldsymbol{X}}_k + \boldsymbol{B}_d u_k$ durchgeführt wird. Würde keine Störung wirken, wäre der Ausdruck auf der rechten Gleichungsseite gleich Null, es würde also $\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1} - \boldsymbol{A}_d\hat{\boldsymbol{X}}_k - \boldsymbol{B}_d u_k = \boldsymbol{0}$ gelten. Wirkt nun jedoch eine Störgröße w_l, kommt es zu einer Abweichung, aus welcher eine Schätzung für die Störgröße ermittelt werden kann.

Im Rahmen der gegenständlichen Erfindung wurde allerdings erkannt, dass die beschriebene Art der Schätzung mehrere Nachteile aufweist, unter anderem, dass die Schätzung der Störgrößen $\hat{w}_{2,k}$ erst korrekt wird, wenn die Schätzung des Zustandsvektors $\hat{\boldsymbol{X}}_k$ konvergiert ist. Ist es nicht möglich, eine zügige Konvergenz sicherzustellen, kann es mitunter beträchtliche Zeit in Anspruch nehmen, bis korrekte Störgrößen-Schätzwerte bereitgestellt werden können.

Es kann aus diesem Grund eine andere Art der Störgrößenschätzung eingesetzt werden, bei welcher insbesondere der Regelfehler e_y=r-y berücksichtigt wird. Zu diesem Zweck kann das Gleichungssystem

$$\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1} = \boldsymbol{A}_d\hat{\boldsymbol{X}}_k + \boldsymbol{B}_d u_k + \boldsymbol{E}_d w_{2,k} + \bar{\boldsymbol{L}}_1 e_{y,k}$$
$$\hat{w}_{2,k+1} = \hat{w}_k + \bar{\boldsymbol{L}}_2 e_{y,k}$$

angegeben werden, aus welchem die unbekannte $\hat{w}_{2,k}$ ermittelt werden kann. Setzt man beispielsweise die zweite Gleichung des obigen Gleichungssystems in die erste Gleichung ein, ergibt sich nach Umformung die Rechenvorschrift

$$\hat{w}_{2,k+1} = \boldsymbol{E}_d{}^{+}\left(\hat{\boldsymbol{X}}_{k+1} - \boldsymbol{A}_d\hat{\boldsymbol{X}}_k - \boldsymbol{B}_d u_k - (\bar{\boldsymbol{L}}_1 - \boldsymbol{E}_d\bar{\boldsymbol{L}}_2)e_{y,k}\right)$$

für den zu schätzenden Störgrößenvektor. Darin wird die Wirkung des zusätzlichen, auf dem Regelfehler basierenden Korrekturterms ersichtlich. Ein wesentlicher Vorteil der Formulierung des Störgrößenbeobachters SB in Form zweier separater Differenzengleichungen ist, dass die Wahl der festzulegenden Verstärkungsfaktoren $\bar{\boldsymbol{L}}_1$ und $\bar{\boldsymbol{L}}_2$ auf eine besonders effiziente Weise erfolgen kann.

Nachfolgend wird eine zu diesem Zweck mögliche und besonders elegante Herangehensweise dargelegt. Konkret kann erneut auf den Referenz-Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ zurückgegriffen werden, welcher sich, wie beschrieben, aus der Referenzgröße r gemäß

$$r = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X}_r$$

ergibt. Fasst man die beiden Differenzengleichungen des Störgrößenbeobachters SB zusammen und setzt man $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{C}$, kann folgende Beschreibung angegeben werden:

$$\begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{X}}_{k+1} \\ \widehat{w}_{2,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_d & \boldsymbol{E}_d \\ 0 & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{X}}_k \\ \widehat{w}_{2,k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix} [\boldsymbol{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{X}}_k \\ \widehat{w}_{2,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_d \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix} [\boldsymbol{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= \left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_d & \boldsymbol{E}_d \\ 0 & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix} [\boldsymbol{C} \quad 0] \right) \begin{bmatrix} \widehat{\boldsymbol{X}}_k \\ \widehat{w}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_d \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix} [\boldsymbol{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_r \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Die Wahl der Verstärkungsfaktoren $\bar{\boldsymbol{L}}_1, \bar{\boldsymbol{L}}_2$ wird dadurch auf die Dimensionierung eines Vektors $\begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix}$ zurückgeführt, der die Matrix $\left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_d & \boldsymbol{E}_d \\ 0 & \boldsymbol{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{L}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{L}}_2 \end{bmatrix} [\boldsymbol{C} \quad 0] \right)$ stabilisiert, d.h. der sicherstellt, dass die Eigenwerte der Matrix innerhalb des Einheitskreises liegen. Dazu sind aus der regelungstechnischen Literatur verschiedene Ansätze bekannt. Ausgehend von dieser Gleichung kann erneut aus einer Vielzahl von Methoden zur Dimensionierung der Verstärkungsfaktoren $\bar{\boldsymbol{L}}_1, \bar{\boldsymbol{L}}_2$ gewählt werden, wobei als bekanntes Beispiel erneut auf die in der Regelungstechnik hinlänglich bekannte Methode nach Ackermann verwiesen sei.

In den Figuren 5a, 5b sind abschließend Ergebnisse gezeigt, die bei der Regelung einer Lastspannung v_2 eines wie in Fig.3 gezeigten DC/DC-Wandlers 10 erreicht wurden, einmal mittels eines Störgrößenbeobachters SB nach Stand der Technik (strichlierte Linien), einmal mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens (durchgezogene Linien).

Im in Fig.5a gezeigten Szenario ändert sich die als Referenzgröße r für die zu regelnde Spannung v_2 vorgegebene Referenzspannung im Zeitintervall zwischen 2 und 2,5 Sekunden zunächst sprungartig und anschließend rampenförmig. Es ist klar zu erkennen, dass mit dem erfindungsgemäßen Verfahren der durch das Verfahren nach Stand der Technik herbeigeführte Unterschwinger in der Mitte des Diagramms vermieden werden kann und damit einerseits eine höhere Regelungsgenauigkeit erreicht werden kann, andererseits aber auch ein schnelleres Einschwingverhalten und damit einer kürzere Einschwingdauer erzielt werden.

Fig.5b zeigt ein weiteres Ergebnis einer Festwertregelung der zu regelnden Spannung auf 1V bei gleichzeitiger Erhöhung des von der Last 5 gezogenen Laststromes i_L beim Zeitpunkt t=0 Sekunden, im Zuge einer Umschaltung von einem sogenannten „Constant-Current"-Betrieb auf „Constant-Voltage"-Betrieb. Im Vergleich zum Stand der Technik sind die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens insbesondere in punkto Regelungsgenauigkeit klar erkennbar. Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist überdies die geringere Querwirkung zwischen verschiedenen Größen, wie im gegenständlichen Fall durch den gezogenen Laststrom. Wie anhand Fig.5b erkennbar ist, ändert sich die zu regelnde Spannung v_2 trotz sprunghaft ansteigendem Strom kaum.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines technischen Systems (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$), zumindest einer auf das technische System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) beeinflussenden Eingangsgröße (u), einer zu regelnden Ausgangsgröße (y) und zumindest einer auf das System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße (y) beeinflussenden Störgröße w_l, wobei ein mathematisches Zustands-Modell (ZM) zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) angegeben wird und wobei ein Regler (R) in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten aus einem Regelfehler e_y, welcher eine Abweichung zwischen einer vorgegebenen Referenzgröße (r) und der Ausgangsgröße (y) beschreibt, eine Stellgröße (v) ermittelt, welche dem technischen System (1) als Eingangsgröße (u) vorgegeben wird, um die Ausgangsgröße (y) auf die Referenzgröße (r) einzuregeln, **dadurch gekennzeichnet, dass** das mathematische Zustands-Modell (ZM) um ein Ausgangsgrößenmodell (AM), welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße w_l beeinflussten Ausgangsgröße (y) beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell (AZM) erweitert wird, wobei das Ausgangsgrößenmodell (AM) einen von der Ausgangsgröße (y) abhängenden Dynamik-Anteil (AM1) und einen von der Störgröße w_l abhängenden Fehler-Anteil (AM2) aufweist, **dass** während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells (AZM) entworfenen Zustandsbeobachters (ZB) ein aktueller Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ für die zumindest eine Störgröße w_l ermittelt wird, **und dass** während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k der ermittelte Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ dem Regler (R) zugeführt wird und der Regler (R) den Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße (v) berücksichtigt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Dynamik-Anteil (AM1) ausschließlich von der Ausgangsgröße (y) abhängt **und dass** der Fehler-Anteil (AM2) ausschließlich von der zumindest einen Störgröße w_l abhängt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels des Zustandsbeobachters (ZB) für zumindest eine Zustandsgröße (x_i) der n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) des technischen Systems (1) ein aktueller Zustands-Schätzwert ($\hat{x}_{i,k}$) ermittelt wird, **und dass** mittels eines auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells (AZM) entworfenen Störgrößenbeobachters (SB) aus einem aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ und/oder aus zumindest einem vergangenen Regelfehler $e_{y,k-j}$, sowie aus dem aktuellen, zumindest einen mit dem Zustandsbeobachter (ZB) ermittelten Zustands-Schätzwert $\hat{x}_{i,k}$ und aus bekannten Zustands-Schätzwerten $\hat{x}_{i,k-j}$ von zumindest

einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} der aktuelle Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ ermittelt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein dem aktuellen Regelungs-Zeitschritt t_k unmittelbar vorhergehender Regelungs-Zeitschritt t_{k-1} als vergangener Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} verwendet wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 oder 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der aktuelle Regelfehler $e_{y,k}$ als durch zumindest einen linearen Gewichtungsfaktor $\bar{L}$ gewichteter aktueller Regelfehler $\bar{L}e_{y,k}$ bei der Ermittlung des zumindest einen Störgrößen-Schätzwertes $\hat{w}_l$ berücksichtigt wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine lineare Gewichtungsfaktor $\bar{L}$ derart gewählt wird, dass eine das zeitliche Verhalten des zumindest einen Störgrößen-Schätzwertes $\hat{w}_l$ beschreibende Matrix Eigenwerte innerhalb des Einheitskreises der komplexen Zahlenebene oder in der linken offenen Halbebene der komplexen Zahlenebene aufweist und damit eine asymptotisch stabile Dynamik beschreibt.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells (AZM) entworfener Regler (R) ohne Integralanteil zum Regeln der Ausgangsgröße (y) eingesetzt wird, wobei der zumindest eine Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_l$ einer aus einem Regelgesetz ohne Störgrößenkompensation hervorgehenden, unkompensierten Stellgröße zur Störgrößenkompensation überlagert wird.

8. Regelkreis (100) zur Regelung eines technischen Systems (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$), zumindest einer auf das System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) beeinflussenden Eingangsgröße (u), einer Ausgangsgröße (y) und zumindest einer auf das System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße (y) beeinflussenden Störgröße w_l, wobei ein mathematisches Zustands-Modell (ZM) zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) angegeben wird, wobei eine Steuereinheit (2) vorgesehen ist, auf welcher ein Regler (R) implementiert ist, welcher ausgestaltet ist, in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten aus einem Regelfehler e_y, welcher eine Abweichung zwischen einer vorgegebenen Referenzgröße (r) und der Ausgangsgröße (y) beschreibt, eine Stellgröße (v) zu ermitteln und die Stellgröße (v) dem technischen System (1) als Eingangsgröße (u) vorzugeben, um die Ausgangsgröße (y) auf die Referenzgröße (r) einzuregeln, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit (2) ausgestaltet ist, das mathematische Zustands-Modell (ZM) um ein Ausgangsgrößenmodell (AM), welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße w_l beeinflussten Ausgangsgröße (y) beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell (AZM) zu erweitern, wobei das Ausgangsgrößenmodell (AM) einen von der Ausgangsgröße (y) abhängenden Dynamik-Anteil (AM1) und einen von der zumindest einen

Störgröße w_l abhängenden Fehler-Anteil (AM2) aufweist, **dass** in der Steuereinheit (2) ein auf Basis des Ausgangs-Zustands-Modells (AZM) entworfener Zustandsbeobachter (ZB) vorgesehen ist, welcher ausgestaltet ist, während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k einen aktuellen Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_{l,k}$ für die zumindest eine Störgröße w_l zu ermitteln, **und dass** die Steuereinheit (2) ausgestaltet ist, während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k dem Regler (R) ermittelte Störgrößen-Schätzwert $\hat{w}_l$ zuzuführen.

9. Regelkreis (100) nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** das technische System (1) in Form eines bidirektionalen DC/DC-Wandlers (10) gegeben ist.

10. Regelkreis (100) nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der bidirektionale DC/DC-Wandler (10) eine Mehrzahl von Leistungsschaltern (S_{o1}, S_{o2}, S_{o3}, S_{o4}, S_{u1}, S_{u2}, S_{u3}, S_{u4}) umfasst, wobei an den Eingängen (E_1, E_2) des DC/DC-Wandlers (10) eine Gleichspannung (v_0) anliegt und der bidirektionale DC/DC-Wandler (10) eine Lastspannung (v_2) und/oder einen ausgangsseitigen Laststrom (i_L) als Ausgangsgröße (y) zur Verfügung stellt, **und dass** in der Steuereinheit (2) ein Emulationsmodell (3) vorgesehen ist, wobei das Emulationsmodell (3) ausgestaltet ist, eine Referenzspannung (u_R) als Referenzgröße (r) zur Regelung zu berechnen und der Steuerungseinheit (2) zur Regelung zuzuführen.

11. Regelkreis (100) nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit (2) ausgestaltet ist, den aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ als Differenz zwischen der vom Emulationsmodell (3) ermittelten Referenzspannung (u_R) als Referenzgröße (r) und der Lastspannung (v_2) zu ermitteln.

12. Regelkreis (100) nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** in der Steuereinheit (2) ein lineares mathematisches Modells des technischen Systems (1) der Form

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_i}{L_i} & \frac{-1}{L_i} & 0 \\ \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R_o}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \underbrace{v_0 \cdot d}_{u} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{L} \end{bmatrix} \underbrace{v_2}_{w_l}, \qquad y = v_2$$

als Zustands-Modell (ZM) vorgesehen ist, mit Strömen i_1, i_L und einer Spannung v_1 als Zustandsgrößen x_i, einer Lastspannung v_2 als Störgröße w_l, einem Produkt aus einer Zwischenkreisspannung v_0 und einem Tastverhältnis d als Eingangsgröße (u), der Lastspannung v_2 als Ausgangsgröße (y), und mit Widerständen R_i und R_o, Induktivitäten L_i und L und einer Kapazität C_2.

13. Regelkreis (100) nach Anspruch 10 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** in der Steuereinheit (2) ein lineares mathematisches Modell der Form ***AM***: $\frac{d}{dt}v_2 = \underbrace{q \cdot v_2}_{\boldsymbol{AM1}} +$

$\underbrace{\gamma(v_0 \cdot d) + w_l}_{\boldsymbol{AM2}}$ als Ausgangsgrößenmodell AM vorgesehen ist, mit vorgegebenen Konstanten q und γ.

14. Regelkreis (100) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** in der Steuereinheit (2) das Zustands-Modell ZM und das Ausgangsgrößenmodell AM zu einem Ausgangs-Zustands-Modells AZM der Form

$$\boldsymbol{AZM}: \quad \frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_i}{L_i} & \frac{-1}{L_i} & 0 & 0 \\ \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R_o}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \\ v_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} v_0 \cdot d + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w_2$$

kombiniert werden.

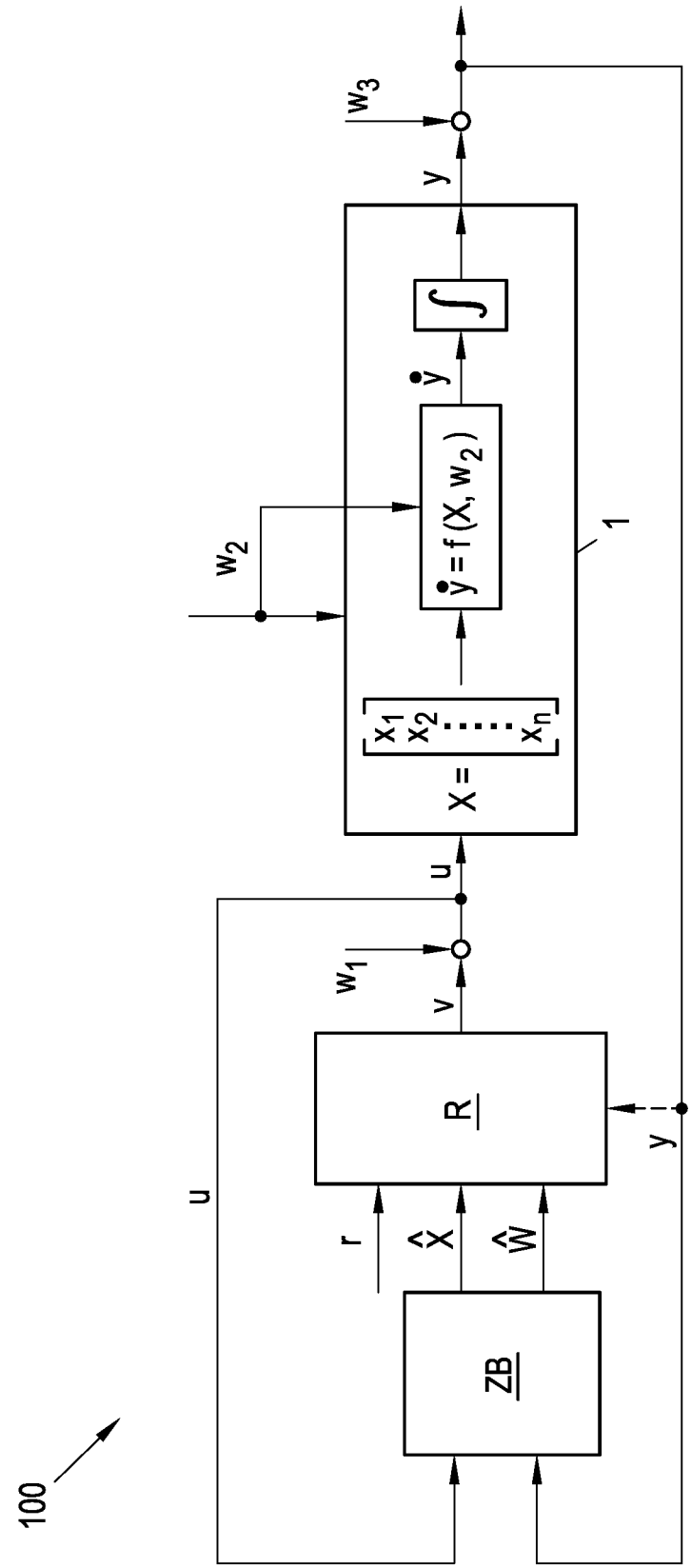


Fig. 1

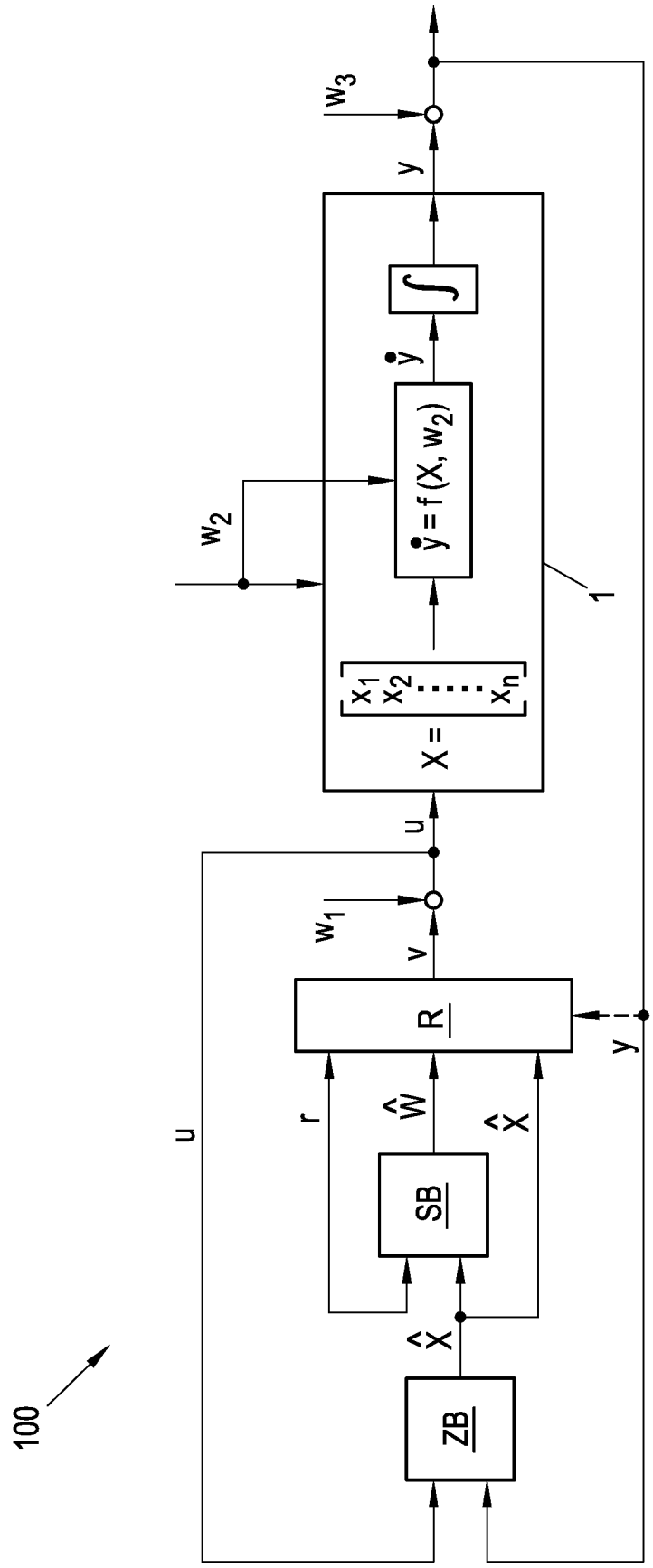

100
ZB
SB
R
$\hat{X}$
$\hat{W}$
r
u
v
w_1
w_2
w_3
y
$\dot{y} = f(X, w_2)$
$\dot{y}$
$\int$
$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$
1

Fig. 2

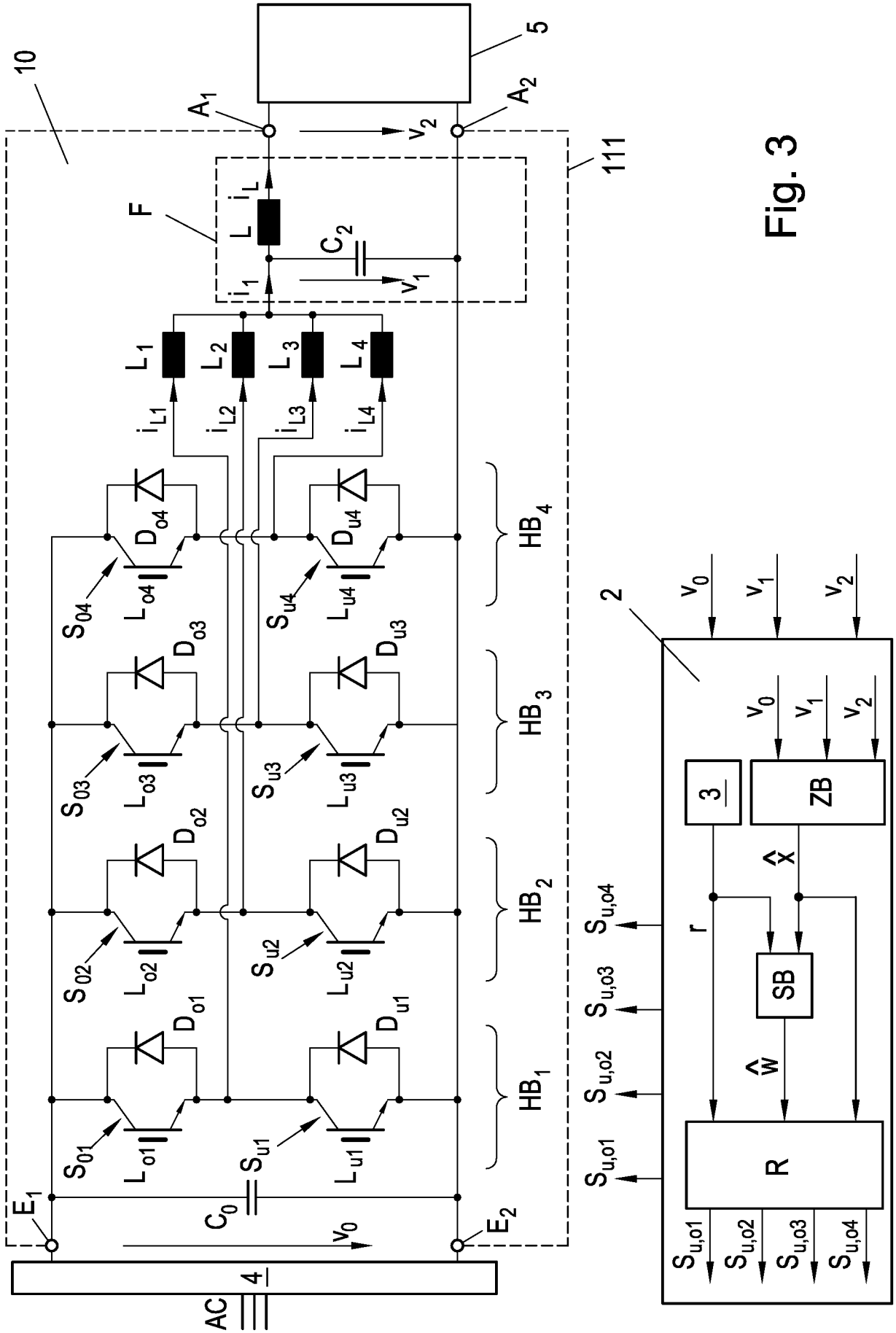

10
5
A1
A2
v2
111
F
L
iL
C2
i1
v1
L1
L2
L3
L4
iL1
iL2
iL3
iL4
Do4
Lo4
So4
Du4
Lu4
Su4
HB4
Do3
Lo3
So3
Du3
Lu3
Su3
HB3
Do2
Lo2
So2
Du2
Lu2
Su2
HB2
Do1
Lo1
So1
Du1
Lu1
Su1
HB1
E1
C0
v0
E2
4
AC
2
v0
v1
v2
3
ZB
x̂
r
SB
ŵ
R
Su,o4
Su,o3
Su,o2
Su,o1

Fig. 3

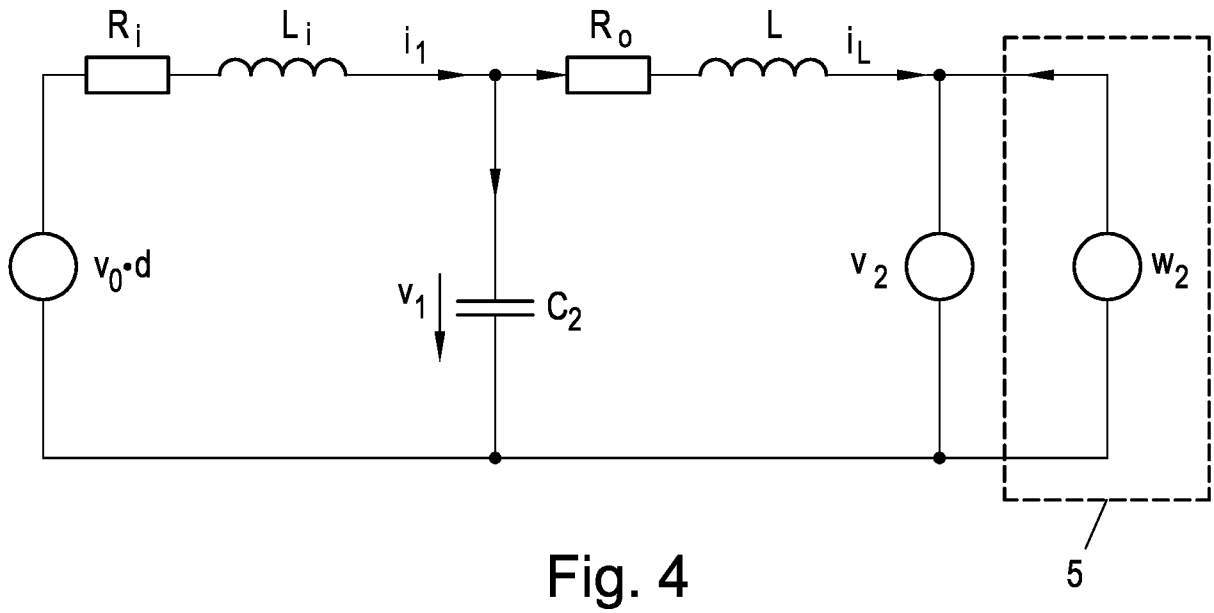

R i
L i
i 1
R o
L
i L
v 0•d
v 1
C 2
v 2
w 2
5

Fig. 4

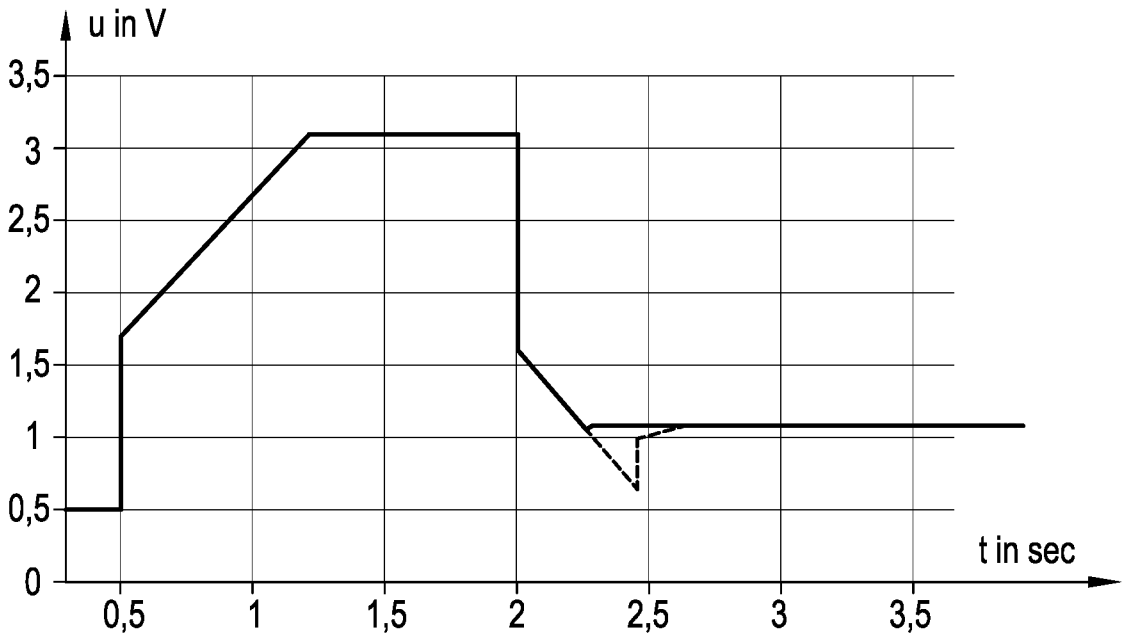

u in V
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
0,5
1
1,5
2
2,5
3
3,5
t in sec

Fig. 5a

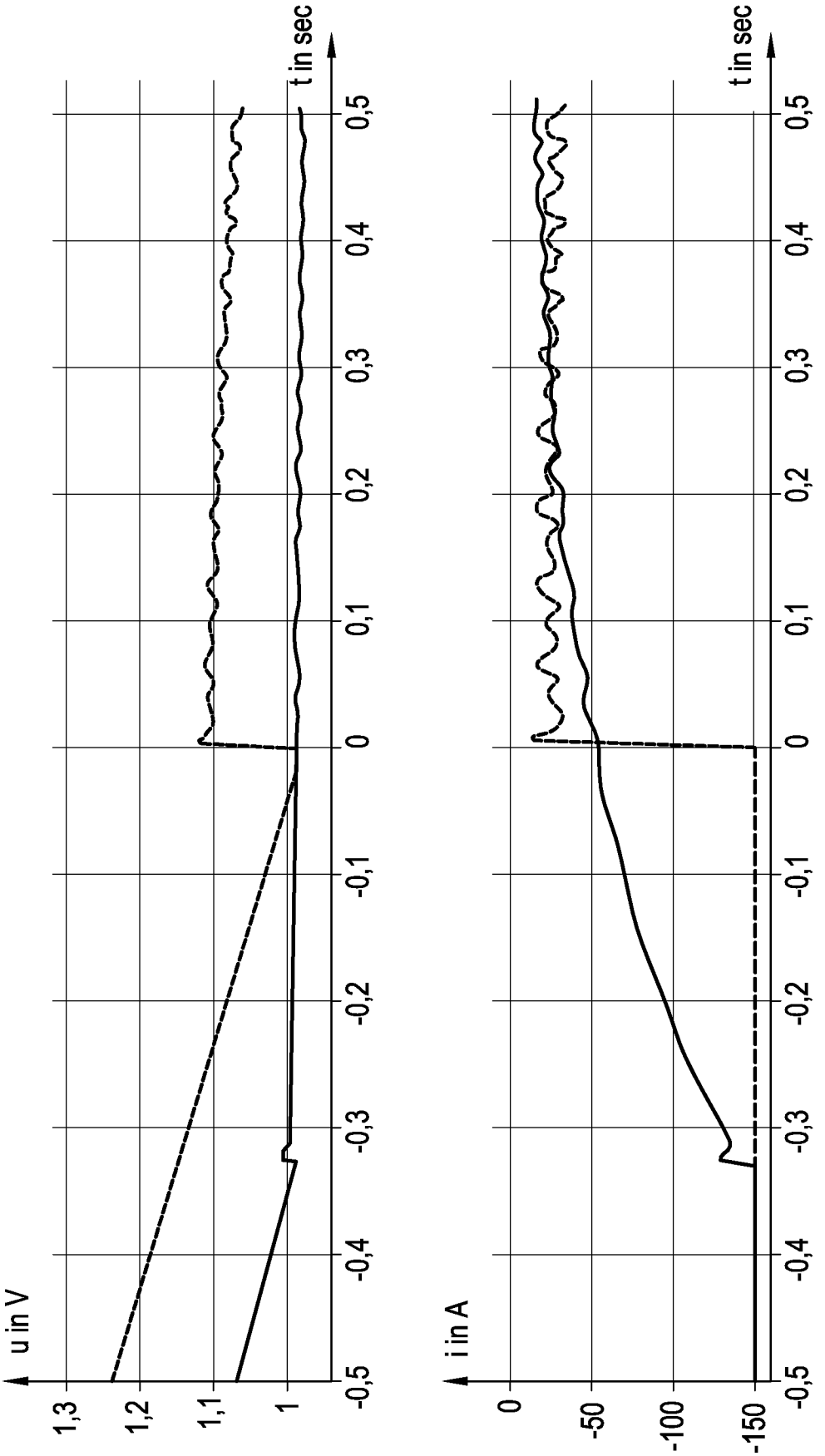

u in V
1,3
1,2
1,1
1
t in sec
-0,5
-0,4
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
i in A
0
-50
-100
-150
t in sec
-0,5
-0,4
-0,3
-0,2
-0,1
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5

Fig. 5b

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/AT2023/060436

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G05B 13/04(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G05B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2009086220 A1 (UNIV FLORIDA [US]; CRISALLE OSCAR D [US] ET AL.) 09 July 2009 (2009-07-09)	1,2,8,9
A	the whole document	3-7,10-14
A	US 2021124316 A1 (BINDLISH RAHUL [US]) 29 April 2021 (2021-04-29) paragraph [0046] - paragraph [0083]	1-14
A	US 2017139423 A1 (EL FERIK SAMI [SA] ET AL) 18 May 2017 (2017-05-18) the whole document	1-14

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
07 March 2024	**21 March 2024**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands**	**Patsiopoulos, N**
Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/AT2023/060436

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO 2009086220 A1	09 July 2009	US 2010268353 A1	21 October 2010
		WO 2009086220 A1	09 July 2009
US 2021124316 A1	29 April 2021	CA 3154268 A1	29 April 2021
		CN 114556236 A	27 May 2022
		EP 4049095 A1	31 August 2022
		KR 20220088881 A	28 June 2022
		TW 202117472 A	01 May 2021
		US 2021124316 A1	29 April 2021
		WO 2021080824 A1	29 April 2021
US 2017139423 A1	18 May 2017	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/AT2023/060436

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. G05B13/04
ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G05B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2009/086220 A1 (UNIV FLORIDA [US]; CRISALLE OSCAR D [US] ET AL.) 9. Juli 2009 (2009-07-09)	1,2,8,9
A	das ganze Dokument	3-7, 10-14
A	US 2021/124316 A1 (BINDLISH RAHUL [US]) 29. April 2021 (2021-04-29) Absatz [0046] - Absatz [0083]	1-14
A	US 2017/139423 A1 (EL FERIK SAMI [SA] ET AL) 18. Mai 2017 (2017-05-18) das ganze Dokument	1-14

☐ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung;; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
7. März 2024	21/03/2024

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Patsiopoulos, N

1

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/AT2023/060436

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2009086220 A1	09-07-2009	US 2010268353 A1	21-10-2010
		WO 2009086220 A1	09-07-2009
US 2021124316 A1	29-04-2021	CA 3154268 A1	29-04-2021
		CN 114556236 A	27-05-2022
		EP 4049095 A1	31-08-2022
		KR 20220088881 A	28-06-2022
		TW 202117472 A	01-05-2021
		US 2021124316 A1	29-04-2021
		WO 2021080824 A1	29-04-2021
US 2017139423 A1	18-05-2017	KEINE	