

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50951/2022 (51) Int. Cl.: **G05B 13/04** (2006.01)
(22) Anmeldetag: 13.12.2022 **G05B 17/02** (2006.01)
(43) Veröffentlicht am: 15.06.2024

(56) Entgegenhaltungen: DE 102019118562 A1 WO 2015154918 A1 DEUTSCHER, Joachim: "Entwurf dualer Störbeobachter für linear konzentriert- und verteilt-parametrische Systeme" at - Automatisierungstechnik 59 (2011) 9 / DOI 10.1524/auto.2011.0947 <URL: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1524/auto.2011.0947/pdf> NAM, N.N.et.al. "Robust Tracking Control of Dual-Active_Bridge DC-DC Converters with Parameter Uncertainties and Input Saturation" Mathematics 2022, 10, 4719; 12. Dezember 2022 <URL: https://doi.org/10.3390/math10244719>	(71) Patentanmelder: AVL List GmbH 8020 Graz (AT) (72) Erfinder: Nguyen Ngoc Anh Dr. 8045 Graz (AT) (74) Vertreter: Patentanwälte Pinter & Weiss OG 1040 Wien (AT)
---	---

(54) **Verfahren zur Regelung eines technischen Systems - Beobachterkaskade**

(57) Um eine präzise und recheneffiziente Methode zur Schätzung und Kompensation von Störgrößen ($w_1...w_p$), welche auf ein zu regelndes, technisches System (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1...x_n$) wirken, anzugeben, werden mittels eines Zustandsbeobachters (ZB) für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen ($x_1...x_m$) aktuelle Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, ..., \hat{x}_{m,k}$ ermittelt und mittels eines Störgrößenbeobachters (SB) unter Berücksichtigung eines Regelfehlers $e_{y,k}$ aus den mit dem Zustandsbeobachter (ZB) ermittelten Zustands-Schätzwerten $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, ..., \hat{x}_{m,k}$ Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, ..., \hat{w}_{p,k}$ für die Störgrößen ($w_1...w_p$) ermittelt.

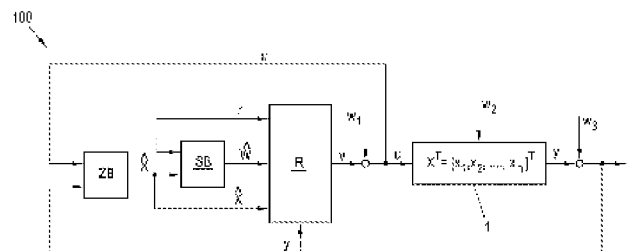


Fig. 2

Zusammenfassung

Um eine präzise und recheneffiziente Methode zur Schätzung und Kompensation von Störgrößen ($w_1 \dots w_p$), welche auf ein zu regelndes, technisches System (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) wirken, anzugeben, werden mittels eines Zustandsbeobachters (ZB) für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_m$) aktuelle Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt und mittels eines Störgrößenbeobachters (SB) unter Berücksichtigung eines Regelfehlers $e_{y,k}$ aus den mit dem Zustandsbeobachter (ZB) ermittelten Zustands-Schätzwerten $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ für die Störgrößen ($w_1 \dots w_p$) ermittelt.

10

Fig. 2

Verfahren zur Regelung eines technischen Systems - Beobachterkaskade

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung eines technischen Systems mit n Zustandsgrößen, zumindest einer auf das System wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen beeinflussenden Eingangsgröße, p auf das System wirkenden Störgrößen, wobei p kleiner-gleich n ist, und zumindest einer zu regelnden Ausgangsgröße, 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 Störgrößen umzugehen. Eine klassische Methode ist die Methode der 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 teilweise) 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. Auch 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 und damit langsam oder aufgrund von in der Praxis auftretenden Schmutzeffekten verfälscht ist.

Allgemein können in der Regelungstechnik eine hohe Regelgüte, also insbesondere eine hohe Regelgenauigkeit, eine kurze Anstiegszeit, ein geringes Überspringen 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 Regelgüte auch beim Entwurf von Störgrößenbeobachtern zu berücksichtigen. Wie nachfolgend detailliert ausgeführt wird, kann sich insbesondere die Forderung nach hoher Regelgenauigkeit auf die Schätzung bzw. 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 eine oft wesentliche Ursache für eine
 5 unzureichende Regelgenauigkeit. 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
 10 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.

15 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,
 20 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
 25 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
 30 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 hierbei vielfach hinzu, dass bei modernen
 35 Regelungssystemen auf zunehmend höhere Taktraten und damit zeitlich kürzer werdende Abtastintervalle zurückgegriffen wird. Selbst wenn leistungsstarke Rechnerarchitekturen zur Umsetzung der genannten Regelungs- und/oder Beobachtermethoden 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
 5 einer vorgegebenen Zeitspanne ermittelt werden können.

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
 10 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
 15 und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen beeinflussenden Eingangsgröße, p auf das technische System wirkenden Störgrößen, wobei p kleiner-gleich n ist, und zumindest einer zu regelnden Ausgangsgröße. Wie in der Regelungstechnik üblich, werden dabei die zumindest eine Eingangsgröße und/oder die zumindest eine Ausgangsgröße und/oder zumindest eine der n Zustandsgrößen gemessen. Um die Ausgangsgröße auf eine
 20 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, während eines aktuellen
 25 Regelungs-Zeitschrittes mittels eines Zustandsbeobachters für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen der n Zustandsgrößen des technischen Systems aktuelle Zustands-Schätzwerte zu ermitteln, wobei m größer-gleich eins und kleiner-gleich n ist. Mittels eines Störgrößenbeobachters und ebenfalls während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes werden darauf aufbauend, unter Berücksichtigung eines aktuellen Regelfehlers und/oder
 30 zumindest eines vergangenen Regelfehlers, aus den aktuellen, mit dem Zustandsbeobachter ermittelten zumindest m aktuellen Zustands-Schätzwerten, aus bekannten zumindest m vergangenen Zustands-Schätzwerten von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt, und, falls m kleiner als p ist, aus zumindest einer Anzahl von $p-m$ aktuellen Messwerten der Eingangsgröße und/oder der Ausgangsgröße und/oder von Zustandsgrößen, für welche vom
 35 Zustandsbeobachter kein Zustands-Schätzwert ermittelt worden ist, aktuelle Störgrößen-Schätzwerte für die p Störgrößen ermittelt. Ebenso während des aktuellen Regelungs-

Zeitschritten werden diese aktuellen Störgrößen-Schätzwerte dem Regler zugeführt, sodass der Regler die Störgrößen-Schätzwerte bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße zum Regeln berücksichtigen kann.

Der erfindungsgemäßen Vorgehensweise liegt die Einsicht zugrunde, dass durch die
 5 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
 insbesondere bei einer nur verschwindenden Erhöhung der Komplexität der resultierenden
 10 Regelkreise, geht diese Idee weder aus dem zitierten Stand der Technik hervor, noch aus
 der einschlägigen regelungstechnischen Fachliteratur. Die Erfindung erlaubt es, diese
 bemerkenswerte Einsicht auf eine einfache wie effiziente Art und Weise mit weiteren
 vorteilhaften Ansätzen zur Ermittlung von Störungen zu verknüpfen, wie mit dem Vergleich
 von Zustands-Schätzwerten von unterschiedlichen Regelungszeitschritten. Die
 15 erfindungsgemäße Struktur aus Zustands-Beobachter und Störgrößenbeobachter ist präzise
 und recheneffizient, weist eine geringe Komplexität auf und ist einfach zu parametrieren.

Typischerweise wirkt hierbei zumindest eine Störgröße als Zustandsstörung oder als
 Eingangsstörung und beeinflusst das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen und/oder es
 wirkt zumindest eine Störgröße als Ausgangsstörung und überlagert sich der zumindest
 20 einen zu regelnden Ausgangsgröße.

Ein weiterer, wichtiger Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens ist seine Flexibilität. So
 kann die Erfindung durch meist nur geringfügige Änderungen passgenau an verschiedene
 Anwendungsfälle adaptiert werden.

Konkret kann der Zustandsbeobachter für sämtliche der n Zustandsgrößen Zustands-
 25 Schätzwerte ermitteln, wofür dem Zustandsbeobachter zumindest p oder mehr als p
 Messwerte der Eingangsgröße und/oder der Ausgangsgröße und/oder von Zustandsgrößen
 zugeführt werden können, um auch besonders hohen Genauigkeitsanforderungen gerecht
 zu werden.

Weiters kann ein dem aktuellen Regelungs-Zeitschritt unmittelbar vorhergehender
 30 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 jedoch große Zeitkonstanten auf, kann es demgegenüber vorteilhaft
 sein, zeitlich voneinander weiter entfernt liegende Regelungs-Zeitschritte zur Schätzung
 35 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.

In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung kann eine Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten ermittelt werden, und diese Abweichung
 5 herangezogen werden, um die Störgrößen-Schätzwerte zu ermitteln, erfindungsgemäß, wie beschrieben, unter Berücksichtigung zumindest eines Regelfehlers. Die Bestimmung dieser Abweichung kann bevorzugt mittels Differenzbildung zwischen aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten erfolgen. Diesem Ansatz liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass einerseits ein Regelfehler ein Maß für eine wirkende Störgröße sein kann, andererseits aber
 10 auch eine Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten ein derartiges Maß darstellen kann. Durch die Kombination zweier solcher Maße kann die Genauigkeit der resultierenden Schätzungen in einer besonderen Weise verbessert werden. Da die geschätzten Störgrößen erfindungsgemäß bei der Regelung berücksichtigt werden, schlagen die genannten Genauigkeitsvorteile unmittelbar auf die Regelung der
 15 Ausgangsgröße durch.

Ein weiterer Punkt, in dem die Erfindung flexibel an spezifische Anforderungen von speziellen Anwendungsfällen angepasst werden kann, ist die Art der Berücksichtigung der Regelfehler bei der Schätzung der Störgrößen. Als besonders vorteilhafte Herangehensweise hat sich hierbei jedoch hervorgetan, den aktuellen Regelfehler als durch
 20 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 Gewichtungsfaktoren dadurch auf besonders einfache Weise anhand von Mitteln zur
 25 Auslegung von z.B. Zustandsreglern gewählt werden können, z.B. durch die hinlänglich bekannte Formel nach Ackermann.

Ein wesentlicher Vorteil der erfindungsgemäßen Struktur aus kaskadierten Beobachtern und einem wie oben beschriebenen Regler liegt in der nach wie vor gegebenen Einfachheit des resultierenden Gesamtsystems und den damit einhergehenden geringen Ausführungszeiten,
 30 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
 35 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 Akteur als zu regelndes technisches System aufgefasst werden. Konkret kann ein hochdynamischer Akteur 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 Akteur eine wesentliche Störgröße darstellen kann. Die bei modernen elektrischen Antriebssträngen gegebenen und mitunter sehr hohen Abstraten 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 nach Stand der Technik,

Fig.2 einen erfindungsgemäßen Koppelplan zur Regelung eines technischen Systems,

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 aus dem Stand der Technik bekannten, typischen Regelkreis 200 zum Regeln eines technischen Systems 1. Das in Fig.1 gezeigte technische System 1 weist $n \geq 1$ Zustandsgrößen $x_1, \dots, x_n$ und zumindest eine Eingangsgröße u auf, welche auf das technische System 1 wirkt und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen $x_1, \dots, x_n$ beeinflusst. Auf das technische System 1 wirken weiters die Störgrößen w_1, w_2, w_3 . Es ist im Rahmen der Erfindung allerdings nicht erforderlich, dass immer alle Störgrößen w_1, w_2, w_3 wirken, sondern es ist ausreichend, wenn zumindest eine Störgröße w_1, w_2, w_3 wirkt. Die Störgröße w_1 wirkt als Eingangsstörung, die Störgröße w_2 als Zustandsstörung und die Störgröße w_3 als Ausgangsstörung.

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 $x_1, \dots, x_n$ erforderlich. Mehrere Zustandsgrößen x_i werden typischerweise zu einem Zustandsvektor $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ zusammengefasst (Vektoren und Matrizen werden nachfolgend vorzugsweise groß und fett notiert). Die Anzahl an Zustandsgrößen $x_1, \dots, x_n$ 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 $\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_p]^T$ die $p \geq 1$ wirkenden Störgrößen gesammelt bezeichnet. Auch für die Störgrößen w_1, w_2, w_3 kann mit dem Index $i=1, \dots, p$ die Bezeichnung w_i 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 $x_1, \dots, x_n$ 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.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine Ausgangsgröße y auch einer Zustandsgröße x_i entsprechen kann, oder aber auch von mehreren Zustandsgrößen x_i abhängen kann. Eine Ausgangsgröße y kann dabei eine skalare Ausgangsgröße y sein, wie z.B. bei SISO-Systemen (single-input, single-output) üblich. Eine Ausgangsgröße y kann aber auch eine vektorielle Ausgangsgröße y sein, wie z.B. bei MIMO-Systemen (multiple-input, multiple-output) üblich. Im Fall einer vektoriellen Ausgangsgröße y kann die Ausgangsgröße y dem Zustandsvektor $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ entsprechen, sodass durch die gegenständlich beschriebene Regelung einer Ausgangsgröße y auch das in der Regelungstechnik hinlänglich bekannte Konzept einer Zustandsregelung realisiert werden kann.

Im Zuge des Betriebs eines wie in Fig.1 gezeigten Regelkreises 200 erfolgt eine üblicherweise fortlaufende Vorgabe der Referenzgröße r , was zu einem zeitlichen Verlauf der Referenzgröße r führt. Im Fall einer auf einem Digitalrechner umgesetzten, diskreten 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 $x_1, \dots, x_n$ 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_i vorgesehen. Ausgehend von der Referenzgröße r , einem vom Zustandsbeobachter ZB ermittelten Schätzwert $\hat{X}$ des Zustandsvektors X , wobei $\hat{X}$ einen Vektor von Zustands-Schätzwerten der Zustandsgrößen x_i darstellt, und einem vom Zustandsbeobachter ZB ermittelten Schätzwert $\hat{W}$ des Störgrößenvektors W , wobei $\hat{W}$ einen Vektor von Störgrößen-Schätzwerten $\hat{W} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p]^T$ der Störgrößen w_i 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 $\hat{X}$ 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_i werden in der Praxis häufig Zustandsbeobachter ZB vom sogenannten Luenberger-Typ eingesetzt, wobei auch andere Beobachertypen angewandt werden können, wie z.B. Kalman-Filter.

- Eine wie in Fig.1 gezeigte kombinierte Schätzung von Zustandsgrößen x_i und Störgrößen w_i stellt einen im Stand der Technik bekannten Ansatz dar. Aufbauend auf sogenannten Störgrößenmodellen, also Modellen des dynamischen bzw. zeitlichen Verhaltens der zu schätzenden Störgrößen w_i , wird dabei üblicherweise die Idee umgesetzt, ein bestehendes mathematisches Modell des zu regelnden technischen Systems 1 um die genannten Störgrößenmodelle zu erweitern, sodass die Störgrößen w_i als weitere Zustandsgrößen x_i im

erweiterten Zustandsraummodell berücksichtigt werden. Ein mathematisches Modell eines technischen Systems 1 kann bekanntermaßen als Zustandsraummodell in Form einer vektorwertigen Zustandsdifferentialgleichung oder Zustandsdifferenzengleichung gegeben sein, das typischerweise die zeitliche Änderung des Zustandsvektors $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ beschreibt (im Fall einer Erweiterung um ein Störgrößenmodell zeitliche Änderung eines erweiterten Zustandsvektors $\mathbf{X}^* = [x_1, x_2, \dots, x_n, w_1, w_2, w_3, \dots]^T$). Eine vektorwertige zeitdiskrete Differenzengleichung sowie eine vektorwertige zeitkontinuierliche Differentialgleichung können als lineare oder als nichtlineare Gleichungen gegeben sein.

Die bekannten Ansätze nach Stand der Technik sehen nun vielfach vor, für ein derartig erweitertes Zustandsraummodell einen Zustandsbeobachter ZB zu entwerfen, der für die Zustandsgrößen $x_1, x_2, \dots, x_n$ sowie für die Störgrößen w_1, w_2, w_3 Schätzwerte ermittelt. Auf diese Weise ermittelte Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ können nachfolgend in einem Regler R zur Störgrößenkompensation herangezogen werden, beispielsweise indem die Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ einer aus einem Regelgesetz ohne Kompensation hervorgehenden, unkompensierten Stellgröße überlagert werden, beispielsweise durch Addition oder Subtraktion oder gewichtete Addition oder gewichtete Subtraktion der Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$. Vor einer derartigen Überlagerung können die Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ auch einer Filterung unterzogen werden.

Diese Vorgehensweise weist allerdings eine Reihe von Nachteilen auf. So müssen üblicherweise die dynamischen Eigenschaften der Störgrößen w_i bekannt sein, um geeignete und ausreichend präzise Störgrößenmodelle angeben zu können. Ebenso muss im Vorhinein klar sein, welche Störgrößen zu erwarten sind. Das ist oftmals aber nicht der Fall.

Diese Nachteile werden durch die Erfindung vermieden, wie nachfolgend anhand Fig.2 erklärt wird. Konkret zeigt Fig.2 ein Blockschaltbild eines erfindungsgemäßen 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. Konkret ist der Störgrößenbeobachter SB im Anschluss an den Zustandsbeobachter ZB angeordnet, sodass der Zustandsbeobachter ZB lediglich Zustands-Schätzwerte $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n]^T$ zu ermitteln und als Ausgangsgrößen auszugeben braucht, der Störgrößenbeobachter SB demgegenüber lediglich Störgrößen-Schätzwerte $\hat{\mathbf{W}} = [\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p]^T$ bestimmen muss. Die zu Fig.1 vorgebrachten Ausführungen bezüglich Störgrößen w_1, w_2, w_3 , Zustandsgrößen $x_1, \dots, x_n$, Eingangsgröße u , Ausgangsgröße y , Regler R, Stellgröße v , vektorieller Notation, Messung usw. sind hinsichtlich des in Fig.2 gezeigten Koppelplanes nach wie vor vollumfänglich gültig.

Im Rahmen des in Fig.2 gezeigten, erfindungsgemäßen Koppelplanes ist konkret vorgesehen, zunächst während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels eines Zustandsbeobachters ZB für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen x_i der n Zustandsgrößen x_i des technischen Systems 1 aktuelle Zustands-Schätzwerte $\hat{X}_k =$

5 $[\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}]^T$ 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 $\hat{X}_k = [\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}]^T$, aus einem aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ und/oder aus zumindest einem vergangenen Regelfehler $e_{y,k-j}$, aus bekannten zumindest m

10 vergangenen Zustands-Schätzwerten $\hat{X}_{k-j} = [\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \dots, \hat{x}_{m,k-j}]^T$ 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 $x_1, \dots, x_n$, für welche vom Zustandsbeobachter ZB kein Zustands-Schätzwert $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt worden ist, aktuelle Störgrößen-Schätzwerte

15 $\hat{W}_k = [\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}]^T$ für die p Störgrößen w_i ermittelt.

Hierbei wurde erkannt, dass es beispielsweise zur Bildung eines Gleichungssystems, aus welchem in weiterer Folge p Störgrößenschätzwerte für p Störgrößen w_i ermittelbar sind, ausreicht, dem Störgrößenbeobachter SB lediglich p Größen zur Verfügung zu stellen, wie insbesondere p Zustands-Schätzwerte $\hat{X}_k = [\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{p,k}]^T$, die der Zustandsbeobachter

20 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

25 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 $x_1, \dots, x_n$, für welche vom Zustandsbeobachter ZB kein Zustands-Schätzwert $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt worden ist, zugeführt werden. Es können aber natürlich auch Schätzwerte für alle n Zustandsgrößen

30 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

35 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.

Ebenso sei angemerkt, dass der vergangene Regelfehler $e_{y,k-j}$ und die bekannten zumindest m Zustands-Schätzwerten $\hat{\mathbf{X}}_{k-j} = [\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \dots, \hat{x}_{m,k-j}]^T$ zwar vorzugsweise von einem gemeinsamen vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} stammen, dies aber keine zwingende Voraussetzung der Erfindung darstellt. 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 $\hat{\mathbf{X}}_{k-o} = [\hat{x}_{1,k-o}, \hat{x}_{2,k-o}, \dots, \hat{x}_{m,k-o}]^T$ jedoch von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-o} .

Daran anschließend ist erfindungsgemäß vorgesehen, die ermittelten Störgrößen-Schätzwerte $\hat{\mathbf{W}}_k = [\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}]^T$ dem Regler R zuzuführen, sodass der Regler R die Störgrößen-Schätzwerte $\hat{\mathbf{W}}_k = [\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}]^T$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße v_k berücksichtigen kann.

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

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

dynamische Verhalten der zu schätzenden Störgrößen präzise Störgrößen-Schätzwerte zu ermitteln. Eine aufwendige Modellbildung für Störgrößenmodelle und damit einhergehende Probleme, wie mit komplexen Störgrößenmodellen einhergehende Probleme hinsichtlich Echtzeitfähigkeit, werden so vermieden.

- 5 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,
- 10 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

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

- 15 zusammengefasst werden. Die Parameter g , H^+ leiten sich dabei von den obigen beispielhaften Differenzgleichungen ab, sodass H^+ eine Inverse oder eine Pseudo-Inverse oder eine andere invertierende Funktion der den Störgrößenvektor 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
- 20 erzielbaren Robustheit des Störgrößenbeobachter SB.

- Hierbei sei angemerkt, dass die m Zustands-Schätzwerte $\widehat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_m]^T$ nicht den ersten m Zustandsvariablen $x_1, \dots, x_m$ entsprechen müssen, sondern beliebig ausgewählte m Zustandsvariablen $x_1, \dots, x_m$ der insgesamt n Zustandsvariablen $x_1, \dots, x_n$ sein können. Dieser Umstand ermöglicht es, insbesondere die Komplexität von Zustandsbeobachtern ZB mitunter
- 25 signifikant zu reduzieren. Bei Ansätzen aus dem Stand der Technik, bei denen Zustandsraummodelle um Störgrößenmodelle erweitert werden, müssen typischerweise sämtliche Zustände des erweiterten Modells geschätzt werden. Im Rahmen der Erfindung kann es 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.
- 30 lediglich eine Störgröße w_l wirkt.

- In einer vorteilhaften Weise kann im Rahmen der Erfindung 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 Störgrößen-Schätzwerte $\widehat{W}_k = [\widehat{w}_{1,k}, \widehat{w}_{2,k}, \dots, \widehat{w}_{p,k}]^T$ herangezogenen bekannten zumindest m
- 35 Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k-1}, \hat{x}_{2,k-1}, \dots, \hat{x}_{m,k-1}$ stammen.

Regelkreise 100 mit einer Kaskade aus einem Zustandsbeobachter ZB und einem Störgrößenbeobachter SB 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 Zusammenarbeit 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 viersträngiger 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 HB₁, HB₂, HB₃, HB₄ 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 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). Ein derartiger Referenzstrom i_R kann in weiterer Folge als Referenzgröße r bzw. als Referenzgrößen-Zeitverlauf zur Regelung des Laststromes i_L 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 Durchschnitte-Induktivität L_i , C_2 wie vorhin 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.

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

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_i}{L_i} & -\frac{1}{L_i} & 0 \\ -\frac{1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{1}{L} & -\frac{R_o}{L} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix}}_X + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{v_0 \cdot d}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L} \end{bmatrix}}_E \underbrace{v_2}_w$$

$$y = \underbrace{[0 \quad 0 \quad 1]}_C \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = i_L$$

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. Zur kompakteren Schreibweise werden für den Zustandsvektor, die Dynamikmatrix, den Eingangsvektor, den Stör-Eingangsvektor und den Ausgangsvektor die in der linearen Regelungstechnik üblichen Abkürzungen X, A, B, E, C eingeführt. Im betrachteten Fall wirkt die Lastspannung v_2 als Störgröße w auf das Modell. Der Laststrom i_L stellt die zu regelnde Ausgangsgröße y dar.

Diskretisiert man obiges Modell (z.B. mittels eines Forward- oder Backward-Euler-Verfahrens oder mittels der Methode nach Tustin), kann allgemein die nachstehende, diskrete Modellgleichung angegeben werden:

$$X_{k+1} = A_d X_k + B_d u_k + E_d w_k.$$

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 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 $y = i_L$ 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 $\mathbf{X}$ 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 Überspringen 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

$$u_k = \mathbf{K}_x (\hat{\mathbf{X}}_k - \mathbf{X}_r) + u_r$$

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

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

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 $\mathbf{X}$ im Referenz-Zustandsvektor $\mathbf{X}_r$ zu halten. Der regelungstechnischen

Literatur kann für ein beispielhaftes, lineares System der Form $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d u_k + \mathbf{E}_d w_{2,k}$, $y = \mathbf{C} \mathbf{X}$ z.B. der Vorschlag $u_r = (\mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{B}_d)^{-1} (r - \mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{A}_d)^{-1} \mathbf{E}_d \hat{w}_k)$ entnommen werden, wo insbesondere die Berücksichtigung des Störgrößen-Schätzwertes $\hat{w}_k$ klar ersichtlich wird.

- 5 Die Idee bei der Einführung dieses Referenz-Zustandsvektors $\mathbf{X}_r$ ist es, den Zustandsvektor $\mathbf{X}$ 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.
- 10 Nachfolgend wird gezeigt, wie für obiges Modell ein Zustandsbeobachter ZB zur Ermittlung der Zustands-Schätzung $\hat{\mathbf{X}}_k$ entworfen werden kann. Konkret können beispielsweise ausgehend vom oben angeführten zeitdiskreten Modell die folgenden Beobachtergleichungen für einen Zustandsbeobachter ZB angesetzt werden:

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

15
$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{M} y_k, \quad \hat{y}_k = \mathbf{D} \hat{\mathbf{X}}_k$$

Darin steht $\mathbf{Z}_k$ für einen Hilfszustand, aus welchem gemäß der zweiten der obigen Gleichungen die Schätzung $\hat{\mathbf{X}}_k$ für den zu schätzenden Zustandsvektor $\mathbf{X}_k$ ermittelt werden kann, und $\hat{y}_k$ für eine aus der Schätzung $\mathbf{X}_k$ ermittelte Schätzung der Ausgangsgröße y . Die Matrizen $\mathbf{N}, \mathbf{L}, \mathbf{G}, \mathbf{M}, \mathbf{D}$ sind derart auszulegen, dass der Schätzfehler $\mathbf{e}_{x,k} = \mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_k$

- 20 konvergiert, also gegen $\mathbf{e}_{x,k} = \mathbf{0}$ strebt für einen gegen Unendlich strebenden Index k ($k \rightarrow \infty$). Die Matrix $\mathbf{D}$ kann hier der bereits bekannten Ausgangsmatrix $\mathbf{C}$ entsprechen, kann aber z.B. aus Gründen der Beobachterausslegung auch anders gewählt werden.

Es sei angemerkt, dass im gegenständlichen Fall, in dem lediglich eine Störung w_k wirkt, der Zustandsbeobachter ZB ausgehend von der Ausgangsgröße y_k und der Eingangsgröße u_k

- 25 des technischen Systems 1 die Zustands-Schätzwerte $\hat{\mathbf{X}}_k$ 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_i
- 30 zumindest p Messgrößen, z.B. der Eingangsgröße u und/oder der Ausgangsgröße y und/oder von Zustandsgrößen $x_1 \dots x_n$, 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 beispielsweise zwei zusätzliche weitere Störgrößen w_i wirken (insgesamt würden dann drei
- 35 Störgrößen w_i 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

5 Modell durch die Gleichung

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

festgelegt, wodurch sich aus der Forderung eines konvergenten Schätzfehlers $\mathbf{e}_{x,k}$

unmittelbar eine Forderung nach einer Matrix $\mathbf{N}$, die stabil ist im Sinne von Hurwitz ableiten

lässt (bei diskreten Systemen: alle Eigenwerte der Matrix $\mathbf{N}$ innerhalb des Einheitskreises,

10 bei kontinuierlichen Systemen: alle Eigenwerte der Matrix $\mathbf{N}$ in der linken offenen Halbebene der komplexen Zahlenebene). Im Rahmen der Erfindung wurde diesbezüglich erkannt, dass diese Forderung durch eine Matrix $\mathbf{N}$ erfüllt wird, welche der Gleichung

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

entspricht. Ein derartiger Zustandsbeobachter kann für beliebige Systeme angegeben werden,

15 die durch ein Modell der Form $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d\mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d\mathbf{u}_k + \mathbf{E}_d\mathbf{w}_k$ modelliert werden können, und ist nicht auf den gegenständlich betrachteten DC/DC-Wandler beschränkt.

Darin stehen $\mathbf{I}$ für eine Einheitsmatrix geeigneter Dimension, $(\mathbf{D}\mathbf{E}_d)^+$ für die Pseudo-Inverse von $\mathbf{D}\mathbf{E}_d$ $((\mathbf{D}\mathbf{E}_d)^T(\mathbf{D}\mathbf{E}_d))^{-1}(\mathbf{D}\mathbf{E}_d)^T$ und $[\mathbf{Q} \quad \mathbf{R}]$ für Matrizen, die der Matrix $\mathbf{N}$ wie erwähnt

Eigenwerte innerhalb des Einheitskreises aufprägen. Zur Wahl der Matrizen $[\mathbf{Q} \quad \mathbf{R}]$ sind

20 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 $\mathbf{M}$ kann in ähnlicher Weise beispielsweise

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

angesetzt werden. Es sei angemerkt, dass auch andere Ansätze zum Aufstellen der

25 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 eine exakte Schätzung des Zustandsvektors zu ermitteln, aus welcher in einem nächsten Schritt im Störgrößenbeobachter die gewünschten Störgrößen-Schätzwerte ermittelt werden
30 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 $\hat{\mathbf{w}}_k$ aufgelöst wird:

$$\widehat{W}_k = E_d^+ (\widehat{X}_{k+1} - A_d \widehat{X}_k - B_d u_k).$$

Die Matrix E_d^+ steht hierbei wie vorhin für die Pseudo-Inverse $E_d^+ = (E_d^T E_d)^{-1} E_d^T$. Diese

Vorgehensweise kann interpretiert werden als ein Vergleich eines neuen Schätzwertes

$\widehat{X}_{k+1}$ mit einer Prädiktion dieses neuen Schätzwertes, wobei diese Prädiktion basierend auf

5 zumindest einem vorgehenden Schätzwert $\widehat{X}_k$ und einem störfreien Modell $A_d \widehat{X}_k +$

$B_d u_k$ durchgeführt wird. Würde keine Störung wirken, wäre der Ausdruck auf der rechten

Gleichungsseite gleich Null, es würde also $\widehat{X}_{k+1} - A_d \widehat{X}_k - B_d u_k = \mathbf{0}$ gelten. Wirkt nun jedoch

eine Störgröße w , kommt es zu einer Abweichung, aus welcher eine Schätzung für die Störgröße ermittelt werden kann.

10 Im Rahmen der gegenständlichen Erfindung wurde allerdings erkannt, dass die beschriebene Art der Schätzung mehrere Nachteile aufweist, unter anderem, dass die Schätzung der Störgrößen $\widehat{W}_k$ erst korrekt wird, wenn die Schätzung des Zustandsvektors $\widehat{X}_k$ 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.

15

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

$$\widehat{X}_{k+1} = A_d \widehat{X}_k + B_d u_k + E_d \widehat{W}_k + \bar{L}_1 e_{y,k}$$

$$\widehat{W}_{k+1} = \widehat{W}_k + \bar{L}_2 e_{y,k}$$

angegeben werden, aus welchem die unbekannte $\widehat{W}_k$ ermittelt werden kann. Setzt man bei-

20 spielsweise die zweite Gleichung des obigen Gleichungssystems in die erste Gleichung ein, ergibt sich nach Umformung die Rechenvorschrift

$$\widehat{W}_{k+1} = E_d^+ (\widehat{X}_{k+1} - A_d \widehat{X}_k - B_d u_k - (\bar{L}_1 - E_d \bar{L}_2) e_{y,k})$$

25 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

Differenzgleichungen ist, dass die Wahl der festzulegenden Verstärkungsfaktoren $\bar{L}_1$ und

$\bar{L}_2$ (nicht zu verwechseln mit den Induktivitäten L_1, L_2, L_3, L_4) auf eine besonders effiziente

30 Weise erfolgen kann.

Nachfolgend wird eine zu diesem Zweck mögliche und besonders elegante

Herangehensweise dargelegt. Konkret kann erneut auf den Referenz-Zustandsvektor X_r

zurückgegriffen werden, welcher sich, wie beschrieben, aus der Referenzgröße r gemäß

$$r = C X_r$$

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

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k+1} \\ \hat{\mathbf{W}}_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{E}_d \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_k \\ \hat{\mathbf{W}}_k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_k \\ \hat{\mathbf{W}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{X}_r \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \left(\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{E}_d \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{C} \quad 0] \right) \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_k \\ \hat{\mathbf{W}}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d \\ 0 \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{C} \quad 0] \begin{bmatrix} \mathbf{X}_r \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

- 5 Die Wahl der Verstärkungsfaktoren $\bar{\mathbf{L}}_1, \bar{\mathbf{L}}_2$ wird dadurch auf die Dimensionierung eines Vektors $\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix}$ zurückgeführt, der die Matrix $\left(\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d & \mathbf{E}_d \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{L}}_1 \\ \bar{\mathbf{L}}_2 \end{bmatrix} [\mathbf{C} \quad 0] \right)$ 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 $\bar{\mathbf{L}}_1, \bar{\mathbf{L}}_2$ gewählt werden, wobei als bekanntes Beispiel erneut auf die in der Regelungstechnik hinlänglich bekannte Methode nach Ackermann verwiesen sei.

10 In den Figuren 5a, 5b sind abschließend Ergebnisse gezeigt, die bei der Regelung eines wie in Fig.3 gezeigten DC/DC-Wandlers 10 erreicht wurden, einmal mittels des Regelkreises 200 aus Fig.1 nach Stand der Technik, einmal mittels des erfindungsgemäßen Regelkreises 100 gemäß Fig.2.

Im in Fig.5a gezeigten Szenario beträgt die Referenzgröße r für den zu regelnden Strom i_L 100A, wobei zum Zeitpunkt $t=1,5$ Sekunden ein Sprung auf diesen Sollstrom von 100A vorgenommen wird. Die strichlierte Linie (Stand der Technik) wurde ohne Schätzung der wirkenden Störgröße w erzielt, die durchgezogene Linie mit Schätzung der wirkenden Störgröße w (Erfindung). Es ist klar zu erkennen, dass mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine höhere Regelungsgenauigkeit erreicht werden kann und ein schnellerer Einschwingvorgang möglich wird.

Fig.5b zeigt den eingeschwungenen Zustand der in Fig.5a beschriebenen Regelungsaufgabe. Es ist zu erkennen, dass durch die Erfindung (durchgezogene Linie) auch ohne integrierende Anteile im Regler eine präzise Regelung auf den vorgegebenen Strom von 100A möglich ist. Das Verfahren nach Stand der Technik (strichlierte Linie) führt zu einer verbleibenden Regelabweichung, was im praktischen Einsatz aus offensichtlichen Gründen äußerst unerwünscht ist, insbesondere bei Testsystemen, an die bekanntermaßen vielfach besonders strenge Genauigkeitsanforderungen gestellt werden.

30 Abschließend sei angemerkt, dass die erfindungsgemäße Vorgehensweise der Verwendung eines Zustandsbeobachters ZB und eines Störgrößenbeobachters SB auch mit eingangs diskutierten Ansätzen kombiniert werden kann, in denen ein Zustands-Modell zur Beschreibung der zeitlichen Veränderung der n Zustandsgrößen $x_1 \dots x_n$ vorgesehen ist,

welches um weitere Modellanteile erweitert wird, wie insbesondere Modelle von Ausgangsgrößen mit einem Fehler-Anteil und einem Dynamik-Anteil oder wie Störgrößenmodelle, um beispielsweise Störgrößen w_i und Ausgangsgrößen y und Zustandsgrößen $x_1 \dots x_n$ in einem gemeinsamen Modell zu beschreiben. Verbleiben in einem derartigen Gesamtmodell trotz der Aufnahme von Störgrößen oder Ausgangsgrößen in einen erweiterten Zustandsvektor externe Störgrößen, beispielsweise weil nicht alle Störgrößen modellhaft beschrieben werden können und in das Gesamtmodell mitaufgenommen werden können, kann die gegenständliche Erfindung auch auf ein derartiges Modell angewandt werden.

- 10 In gewissen praktischen Fällen sind insbesondere zu regelnde Ausgangsgrößen y oftmals stark von Störgrößen beeinflusst, sodass es schwierig ist, für eine zu regelnde Ausgangsgröße y eine geeignete Beschreibung des dynamischen Verhaltens anzugeben, was für die Auslegung von Reglern aber meist erforderlich ist. In derartigen Fällen erweist es sich oftmals als vorteilhaft, ein mathematisches Zustands-Modell, welches wie erwähnt das zeitliche Verhalten von Zustandsgrößen beschreiben kann, um ein Ausgangsgrößenmodell, welches das zeitliche Verhalten der von der zumindest einen Störgröße beeinflussten Ausgangsgröße beschreibt, zu einem Ausgangs-Zustands-Modell zu erweitern. Weist dabei das Ausgangsgrößenmodell einen von der Ausgangsgröße y abhängenden Dynamik-Anteil und einen von einer Störung, die das zeitliche Verhalten der Ausgangsgröße beeinflusst, abhängenden Fehler-Anteil auf, ergibt sich erneut das Szenario, dass eine von außen wirkende Störgröße auf das resultierende Modell wirkt, sodass in einer vorteilhaften Weise die gegenständliche Erfindung, basierend auf einem Einsatz eines Störgrößenbeobachters und eines Zustandsbeobachters eingesetzt werden können, um Schätzwerte für die Störung zu ermitteln und diese anschließend in einer Regelung zu berücksichtigen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines technischen Systems (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$),
 zumindest einer auf das technische System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der n
 5 Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) beeinflussenden Eingangsgröße (u), p auf das technische System
 (1) wirkenden Störgrößen ($w_1 \dots w_p$), wobei p kleiner-gleich n ist, und zumindest einer zu
 regelnden Ausgangsgröße (y), wobei die zumindest eine Eingangsgröße (u) und/oder die
 zumindest eine Ausgangsgröße (y) und/oder zumindest eine der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$)
 gemessen werden, und wobei ein Regler (R) in vorgegebenen Regelungs-Zeitschritten aus
 10 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**
 während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k mittels eines Zustandsbeobachters (ZB)
 15 für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_m$) der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) des
 technischen Systems (1) aktuelle Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ ermittelt werden,
 wobei m größer-gleich eins und kleiner-gleich n ist, **dass** während des aktuellen Regelungs-
 Zeitschrittes t_k mittels eines Störgrößenbeobachters (SB) aus einem aktuellen Regelfehler
 $e_{y,k}$ und/oder aus zumindest einem vergangenen Regelfehler $e_{y,k-j}$, aus den aktuellen, mit
 20 dem Zustandsbeobachter (ZB) ermittelten zumindest m aktuellen Zustands-Schätzwerten
 $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$, aus bekannten zumindest m vergangenen Zustands-Schätzwerten
 $\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \dots, \hat{x}_{m,k-j}$ 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 ($x_1, \dots, x_n$), für welche vom
 25 Zustandsbeobachter (ZB) kein Zustands-Schätzwert ermittelt worden ist, aktuelle
 Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ für die p Störgrößen ($w_1 \dots w_p$) ermittelt werden,
und dass während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k die aktuellen Störgrößen-
 Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ dem Regler (R) zugeführt werden und der Regler (R) die
 Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße (v)
 30 berücksichtigt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine Störgröße
 w_i der p Störgrößen ($w_1 \dots w_p$) als Zustandsstörung oder als Eingangsstörung das zeitliche
 Verhalten der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) beeinflusst oder sich als Ausgangsstörung der
 zumindest einen zu regelnden Ausgangsgröße (y) überlagert.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Zustandsbeobachter (ZB) für sämtliche der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{n,k}$ ermittelt.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** dem Zustandsbeobachter (ZB) zum Ermitteln der zumindest m Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ zumindest p aktuelle Messwerte der Eingangsgröße (u) und/oder der Ausgangsgröße (y) und/oder von Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) zugeführt werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **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.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** das technische System (1) mittels eines linearen, zeitdiskreten Zustandsraum-Differentialgleichungssystems der Form $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_k + \mathbf{B}_d u_k + \mathbf{E}_d w_k$ mit einem Zustandsvektor $\mathbf{X}_k = [x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{n,k}]^T$ und vorgegebenen Matrizen $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{E}_d$ mathematisch beschrieben wird, **und dass** der Zustandsbeobachter (ZB) auf Basis dieses Zustandsraum-Differentialgleichungssystems als $\mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{N} \mathbf{Z}_k + \mathbf{L} y_k + \mathbf{G} u_k$, $\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{M} \hat{y}_k$, $\hat{y}_k = \mathbf{D} \hat{\mathbf{X}}_k$ entworfen wird, wobei $\mathbf{Z}_k$ ein Hilfszustand ist, aus dem die aktuellen Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ für zumindest m Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_m$) ermittelt werden, und wobei $\mathbf{N}, \mathbf{L}, \mathbf{G}, \mathbf{M}, \mathbf{D}$ vorgegebene Matrizen sind, von denen die Matrix $\mathbf{N}$ die Gleichung $\mathbf{N} = (\mathbf{I} - \mathbf{E}_d (\mathbf{D} \mathbf{E}_d)^+ \mathbf{D}) \mathbf{A}_d - [\mathbf{Q} \quad \mathbf{R}] \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ -\mathbf{D} (\mathbf{I} - \mathbf{E}_d (\mathbf{D} \mathbf{E}_d)^+ \mathbf{D}) \mathbf{A}_d \end{bmatrix}$ mit einer Einheitsmatrix $\mathbf{I}$ und vorgegebenen Matrizen $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ erfüllt, und die Matrix $\mathbf{M}$ die Gleichung $\mathbf{M} = -\mathbf{E}_d (\mathbf{D} \mathbf{E}_d)^+ + \mathbf{R} (\mathbf{I} - (\mathbf{D} \mathbf{E}_d) (\mathbf{D} \mathbf{E}_d)^+)$ erfüllt.
7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Abweichung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten $\hat{\mathbf{X}}_k, \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ ermittelt wird, **und dass** diese Abweichung herangezogen wird, um die Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p$ zu ermitteln.
8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abweichung mittels einer Differenzbildung zwischen aufeinanderfolgenden Zustands-Schätzwerten $\hat{\mathbf{X}}_k, \hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ ermittelt wird.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der aktuelle Regelfehler $e_{y,k}$ als durch zumindest einen linearen Gewichtungsfaktor $\bar{\mathbf{L}}$ gewichteter aktueller Regelfehler $\bar{\mathbf{L}} e_{y,k}$ bei der Ermittlung der Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p$ berücksichtigt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** der zumindest eine lineare Gewichtungsfaktor $\bar{L}$ derart gewählt wird, dass eine das zeitliche Verhalten der Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \dots, \hat{w}_p$ beschreibende Matrix Eigenwerte innerhalb des Einheitskreises der komplexen Zahlenebene oder in der linken offenen Halbebene der komplexen

5 Zahlenebene aufweist und damit eine asymptotisch stabile Dynamik beschreibt.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Regler (R) ein Regelgesetz ohne Integralanteil verwendet wird, wobei die Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3$ einer aus einem Regelgesetz ohne Störgrößenkompensation hervorgehenden, unkompensierten Stellgröße zur Störgrößenkompensation überlagert

10 werden.

12. Regelkreis (100) zur Regelung eines technischen Systems (1) mit n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$), zumindest einer auf das System (1) wirkenden und das zeitliche Verhalten der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) beeinflussenden Eingangsgröße (u), p auf das System (1) wirkenden Störgrößen ($w_1 \dots w_p$), wobei p kleiner-gleich n ist, und zumindest einer

15 Ausgangsgröße (y), wobei eine Messdaten-Erfassungseinheit vorgesehen ist, welche ausgestaltet ist, die zumindest eine Eingangsgröße (u) und/oder die zumindest eine Ausgangsgröße (y) und/oder zumindest eine der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) messtechnisch zu erfassen, wobei eine Steuereinheit (2) vorgesehen ist, auf welcher ein Regler (R) implementiert ist, wobei der Regler (R) ausgestaltet ist, in vorgegebenen Regelungs-

20 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** in der Steuereinheit (2) ein Zustandsbeobachter (ZB) vorgesehen ist,

25 welcher ausgestaltet ist, während eines aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k für eine Anzahl von zumindest m Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_m$) der n Zustandsgrößen ($x_1 \dots x_n$) des technischen Systems (1) aktuelle Zustands-Schätzwerte $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$ zu ermitteln, wobei m größer-gleich eins und kleiner-gleich n ist, **dass** in der Steuereinheit (2) ein Störgrößenbeobachter (SB) vorgesehen ist, welcher ausgestaltet ist, während eines aktuellen Regelungs-

30 Zeitschrittes t_k aus einem aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ und/oder aus zumindest einem vergangenen Regelfehler $e_{y,k-j}$, aus den aktuellen, mit dem Zustandsbeobachter (ZB) ermittelten zumindest m aktuellen Zustands-Schätzwerten $\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}$, aus bekannten zumindest m vergangenen Zustands-Schätzwerten $\hat{x}_{1,k-j}, \hat{x}_{2,k-j}, \dots, \hat{x}_{m,k-j}$ von einem vergangenen Regelungs-Zeitschritt t_{k-j} , und, falls m kleiner als p ist, aus zumindest einer

35 Anzahl von p-m aktuellen Messwerten der Eingangsgröße (u) und/oder der Ausgangsgröße (y) und/oder von Zustandsgrößen ($x_1, \dots, x_n$), für welche vom Zustandsbeobachter (ZB) kein

Zustands-Schätzwert ermittelt worden ist, aktuelle Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ für die p Störgrößen ($w_1 \dots w_p$) zu ermitteln, **und dass** die Steuereinheit (2) ausgestaltet ist, während des aktuellen Regelungs-Zeitschrittes t_k dem Regler (R) die aktuellen Störgrößen-Schätzwerte $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ zuzuführen, sodass die aktuellen Störgrößen-Schätzwerte

- 5 $\hat{w}_{1,k}, \hat{w}_{2,k}, \dots, \hat{w}_{p,k}$ bei der Ermittlung einer aktuellen Stellgröße (v_k) vom Regler (R) berücksichtigbar sind.

13. Regelkreis (100) nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** das technische System (1) in Form eines bidirektionalen DC/DC-Wandlers (10) gegeben ist.

14. Regelkreis (100) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** der bidirektionale
10 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
15 Emulationsmodell (3) ausgestaltet ist, einen Referenzstrom (i_R) als Referenzgröße (r) zur Regelung zu berechnen und der Steuerungseinheit (2) zur Regelung zur Verfügung zu stellen.

15. Regelkreis (100) nach Anspruch 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Steuereinheit (2) ausgestaltet ist, den aktuellen Regelfehler $e_{y,k}$ als Differenz zwischen dem vom
20 Emulationsmodell (3) ermittelten Referenzstrom (i_R) als Referenzgröße (r) und dem Laststrom (i_L) zu ermitteln.

16. Regelkreis (100) nach Anspruch 14 oder 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** der in der Steuereinheit (2) vorgesehene Zustandsbeobachter (ZB) und der in der Steuereinheit (2) vorgesehene Störgrößenbeobachter (SB) auf Basis eines linearen mathematischen Modells
25 des DC/DC-Wandlers (10) in der Form

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_i}{L_i} & \frac{-1}{L_i} & 0 \\ \frac{-1}{C_2} & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{-R_o}{L} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix}}_x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \underbrace{v_0 \cdot d}_u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-1}{L} \end{bmatrix} \underbrace{v_2}_w, \quad y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_1 \\ v_1 \\ i_L \end{pmatrix} = i_L$$

- entworfen sind, mit Strömen i_1, i_L und einer Spannung v_1 als Zustandsgrößen x_i , einer Lastspannung v_2 als Störgröße w_i , einem Produkt aus einer Zwischenkreisspannung v_0 und einem Tastverhältnis d als Eingangsgröße (u), dem Laststrom i_L als Ausgangsgröße (y), und
30 mit Widerständen R_i und R_o , Induktivitäten L_i und L und einer Kapazität C_2 .

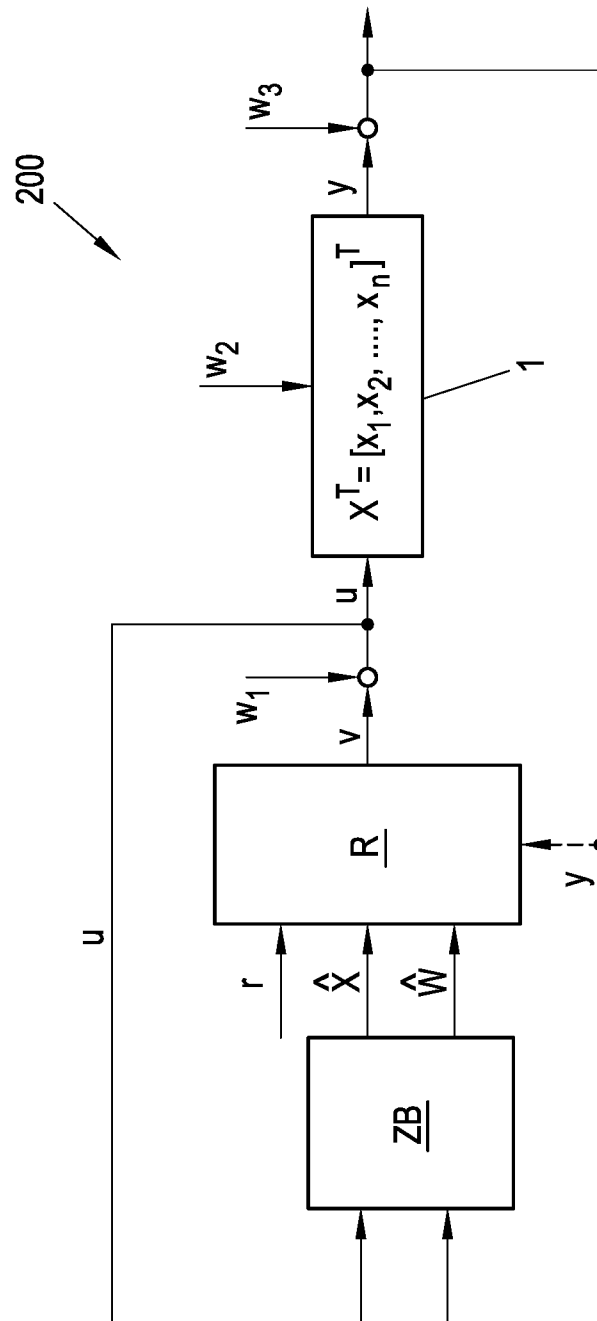


Fig. 1 (Stand der Technik)

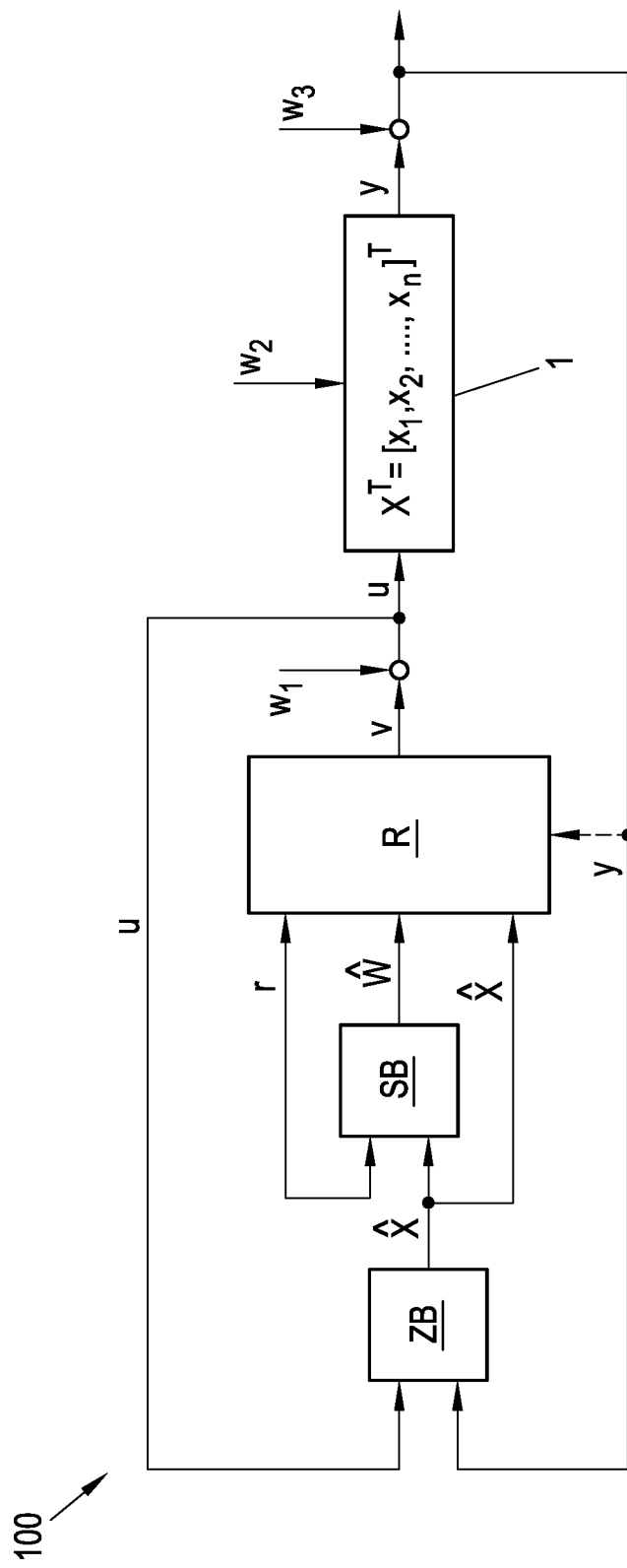


Fig. 2

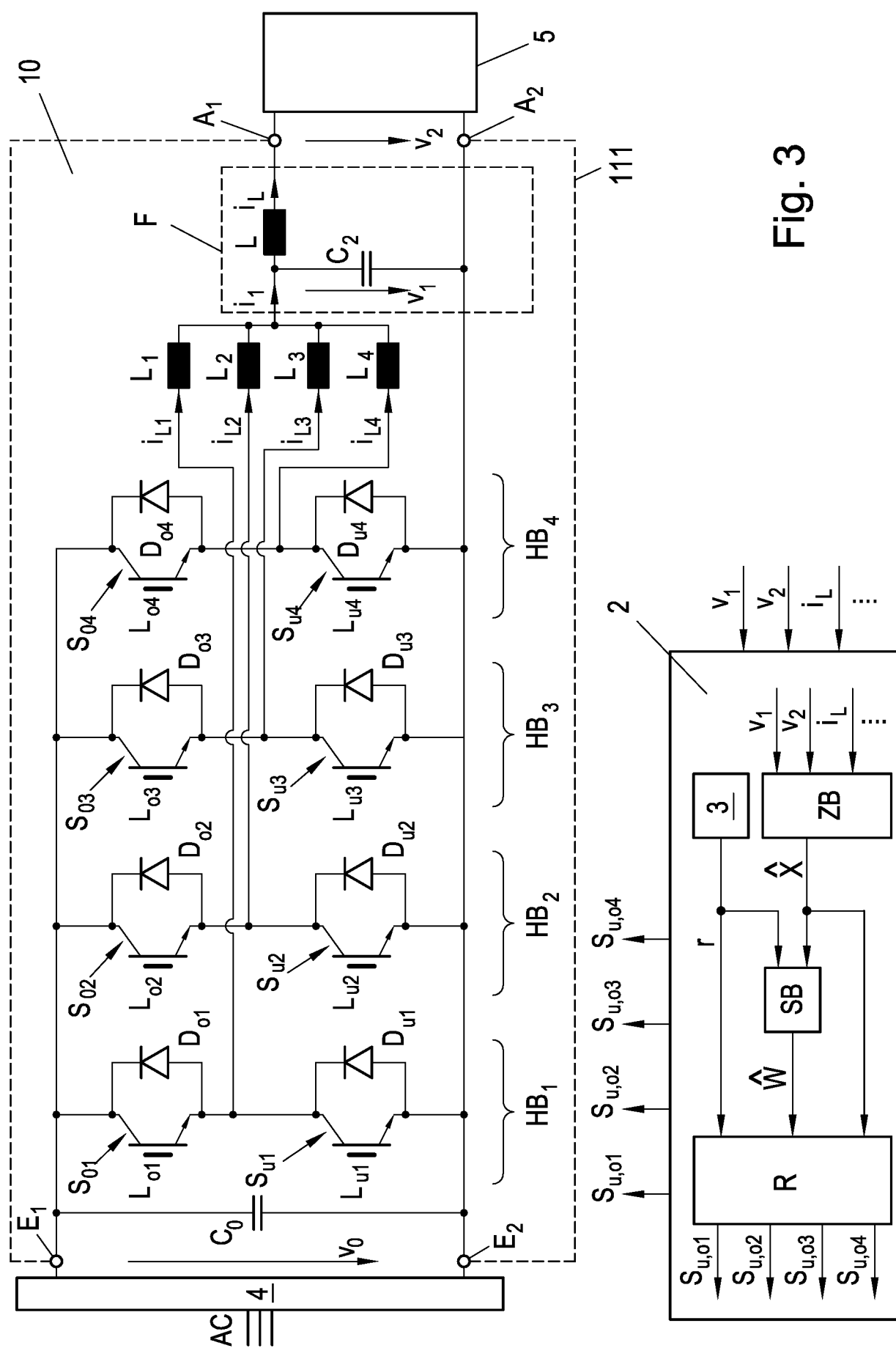


Fig. 3

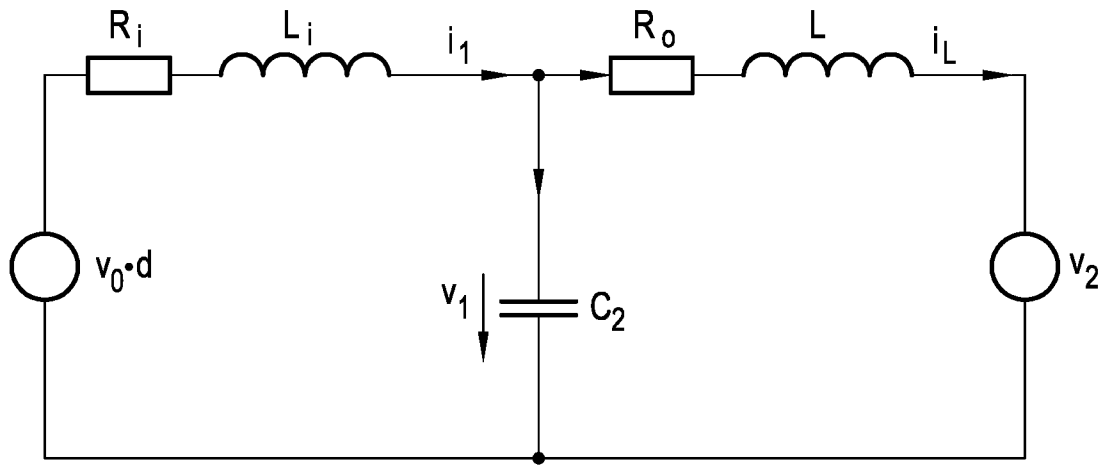


Fig. 4

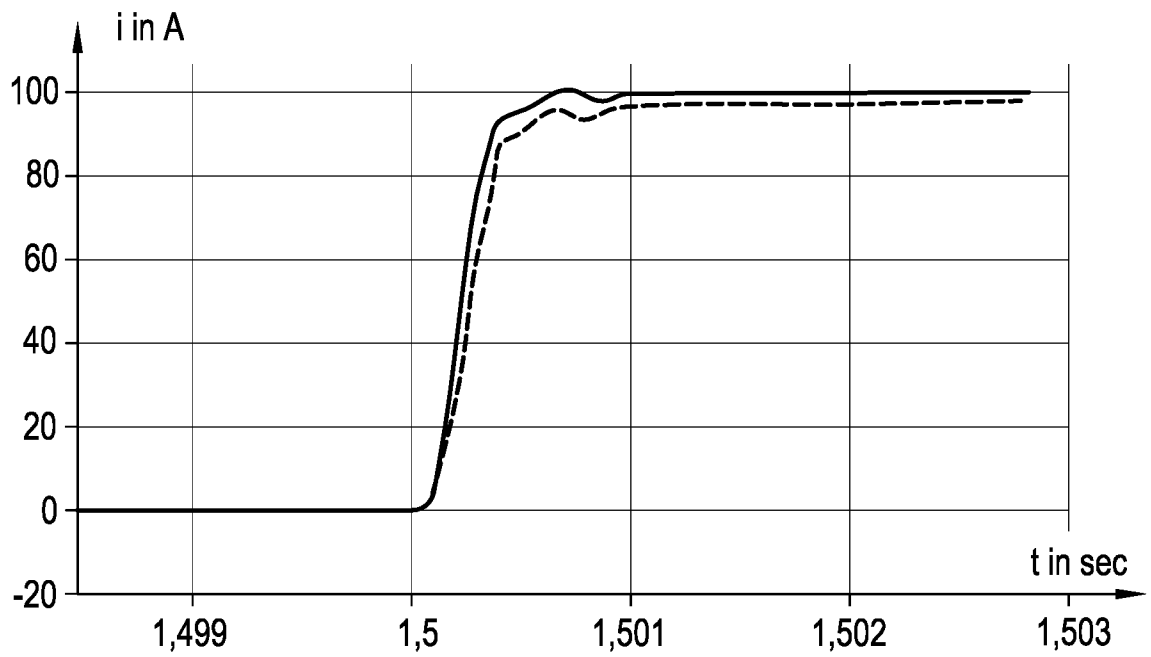


Fig. 5a

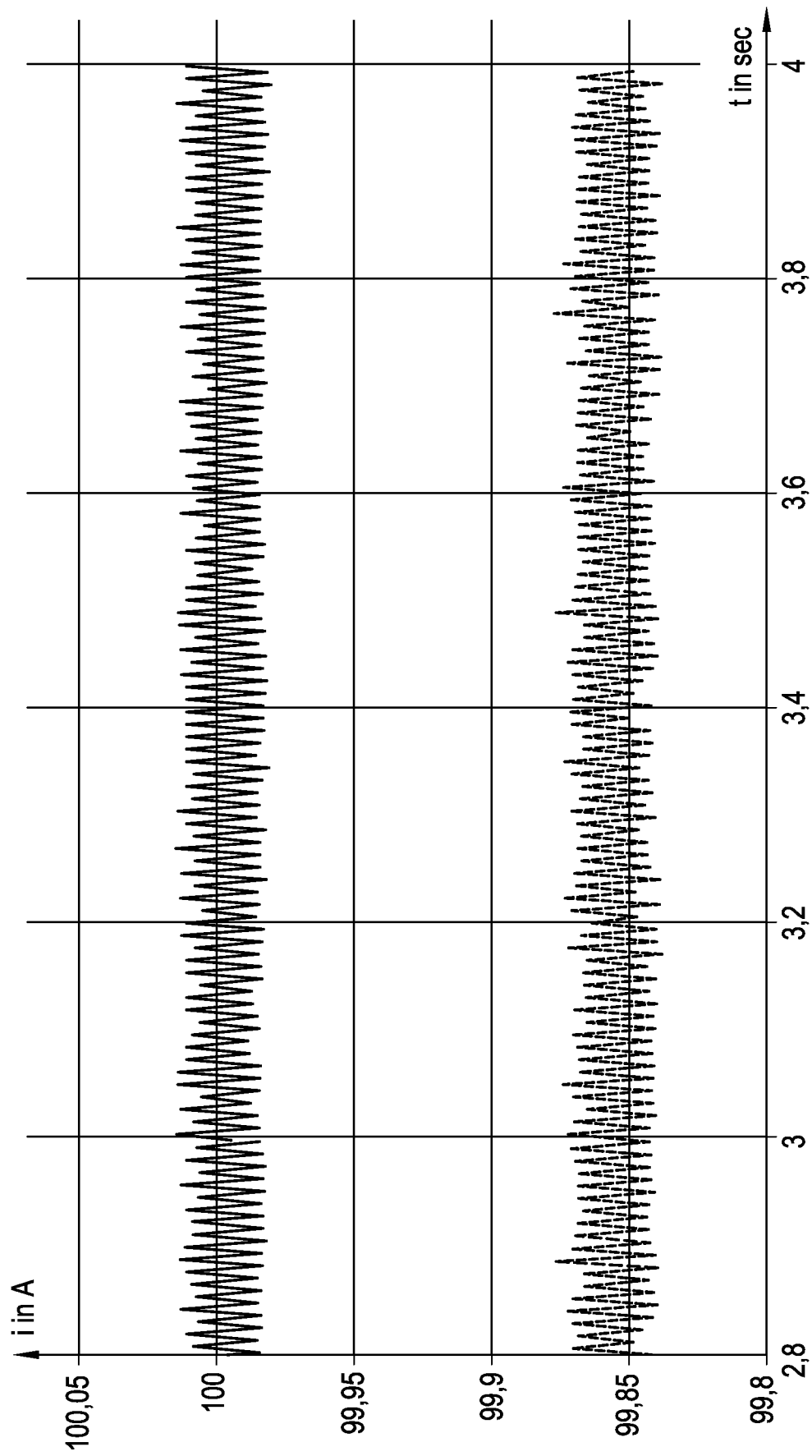


Fig. 5b

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß IPC:
G05B 13/04 (2006.01); G05B 17/02 (2006.01)

Klassifikation des Anmeldungsgegenstands gemäß CPC:
G05B 13/04 (2013.01); G05B 17/02 (2013.01)

Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation):
G05B

Konsultierte Online-Datenbank:
EPODOC, WPIAP, TXTDE, TXTEN, INTERNET: Google Patents, ESPACENET

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 13.12.2022 eingereichten Ansprüchen 1 - 16 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	DE 102019118562 A1 (AVL LIST GMBH [AT]) 09. Januar 2020 (09.01.2020) Zusammenfassung; Paragraphen [0011] - [0017], [0022] - [0024], [0036] - [0041]; Ansprüche 1 - 3, 8 - 10.	1 - 16
A	WO 2015154918 A1 (AVL LIST GMBH [AT]) 15. Oktober 2015 (15.10.2015) Zusammenfassung; Figuren 7, 8 und zugehörige Beschreibung; Ansprüche.	1 - 16
A	DEUTSCHER, Joachim: "Entwurf dualer Störbeobachter für linear konzentriert- und verteilt-parametrische Systeme" at - Automatisierungstechnik 59 (2011) 9 / DOI 10.1524/auto.2011.0947 <URL: https://www.degruyter.com/ document/doi/10.1524/auto.2011.0947/pdf > Der gesamte Artikel insbesondere Kapitel 3 und 4 "Duale Störbeobachter".	1 - 16
A	NAM, N.N.et.al. "Robust Tracking Control of Dual- Active_Bridge DC-DC Converters with Parameter Uncertainties and Input Saturation" Mathematics 2022, 10, 4719; 12. Dezember 2022 <URL: https://doi.org/10.3390/math10244719 > Der gesamte Artikel insbes. Kapitel 1. Introduction	1 - 16
Datum der Beendigung der Recherche: 05.12.2023		
Seite 1 von 1		Prüfer(in): WALTER Peter

^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente:

- X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung: der Anmel-
dungsgegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf
erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
- Y Veröffentlichung von Bedeutung: der Anmeldungsgegenstand kann nicht
als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die
Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen
dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für
einen Fachmann naheliegend ist.

- A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert.
- P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach
dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde.
- E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem
ein „älteres Recht“ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch
nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage
stellen).
- & Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.