

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50969/2019
(22) Anmeldetag: 12.11.2019
(45) Veröffentlicht am: 15.04.2021

(51) Int. Cl.: **F02D 41/24** (2006.01)
F02D 41/14 (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 102017110795 A1
AT 510912 A2
DE 102014007433 A1

(73) Patentinhaber:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
GANDE Marie-Sophie Dipl.Ing.
8101 Gratkorn (AT)
SCHEIDEL Stefan
8020 Graz (AT)
WILLIAMS Philip B. Eng
8075 Hart bei Graz (AT)
WAGNER Andreas Dipl.Ing. (FH)
8502 Lannach (AT)
SATO Takuya
8010 Graz (AT)
COLLET Yoann
91440 Bures sur Yvette (FR)
GRASSBERGER Helmut Peter Dipl.Ing.
8010 Graz (AT)
IVARSON Mats
8111 Gratwein-Strassengel (AT)

(74) Vertreter:
Hartinger Mario Dipl.Ing.
8020 Graz (AT)

(54) Verfahren und System zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Betriebsanalyse einer Maschine und/oder zum Kalibrieren einer Steuerung der Maschine, insbesondere einer Brennkraftmaschine, wobei Testpunkte, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgesucht sind, angefahren werden, wobei beim Anfahren der Testpunkte jeweils wenigstens ein Betriebsparameter in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt (T_n) zum nächsten Testpunkt (T_{n+1}) verändert wird, wobei Betriebsmessungen (meas) an Messpunkten (M_n), welche sich durch eine jeweilige Schrittweite ergeben, und an den eigentlichen Testpunkten (T_n , T_{n+1}) durchgeführt werden, wobei Messdaten aus den Betriebsmessungen zur Analyse und Kalibrierung der Steuerung ausgegeben und kontinuierlich gespeichert werden, sowie ein entsprechendes System.

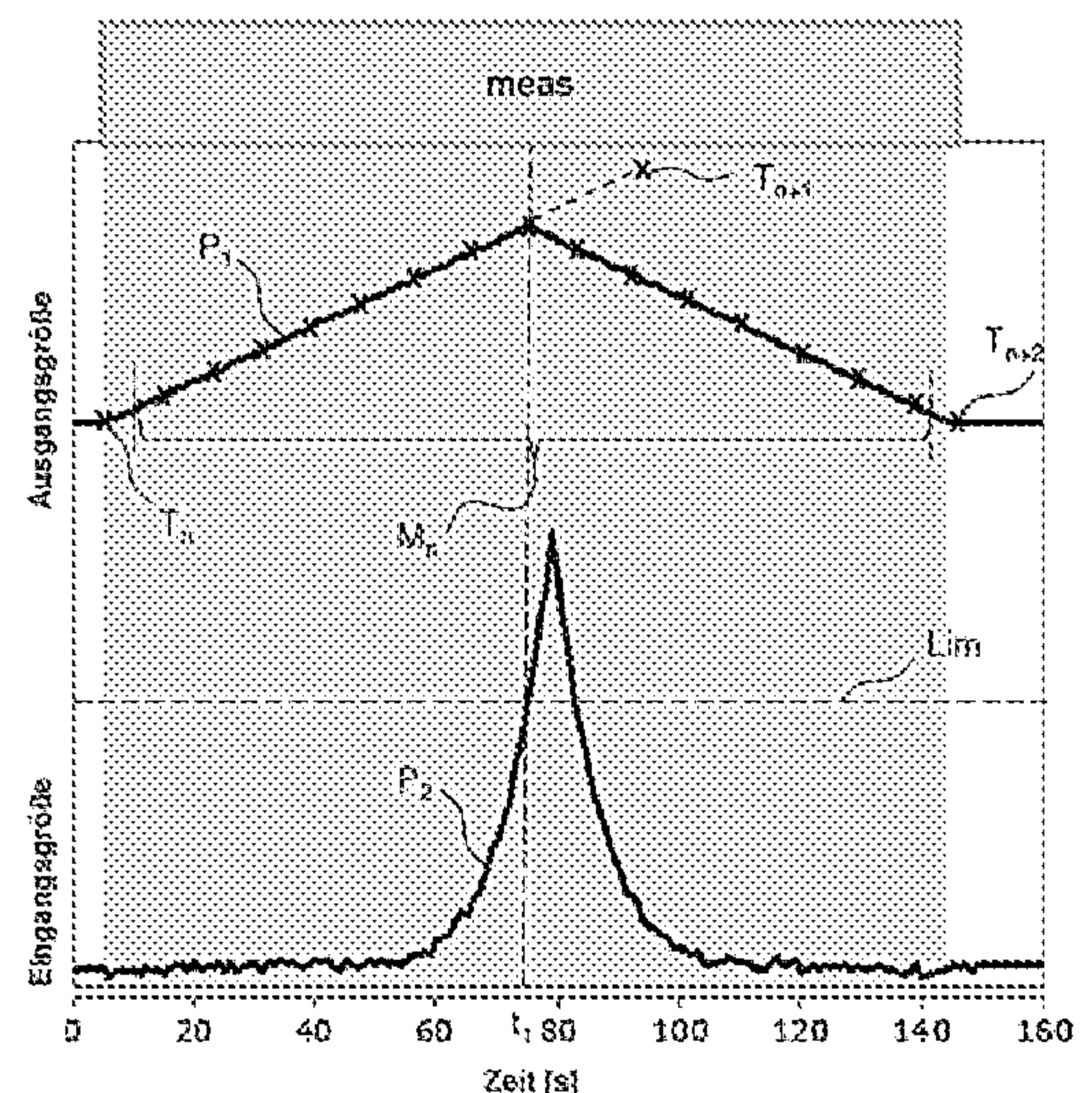


Fig. 4

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine, insbesondere einer Brennkraftmaschine, wobei Testpunkte, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgewählt sind, angefahren werden, wobei beim Anfahren der Testpunkte jeweils wenigstens ein Betriebsparameter in einer Vielzahl von Schritten verändert wird.

[0002] Verfahren zur Kalibrierung der Steuerung einer Brennkraftmaschine sind beispielsweise aus den Dokumenten DE102017110795A1, DE102014007433A1 und AT510912A2 bekannt.

[0003] Zur Kalibrierung von Maschinen, insbesondere Antriebsmaschinen, werden im Allgemeinen Tests auf Prüfständen durchgeführt, wobei für bestimmte Betriebspunkte mit vordefinierter Drehzahl und/oder Last eine Analyse, insbesondere eine Sensitivitätsanalyse, für verschiedene Betriebsparameter durchgeführt wird. Die aus dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse können zum Kalibrieren der Steuerung der Brennkraftmaschine eingesetzt werden, wobei das Ziel eine optimierte Kalibrierung der Brennkraftmaschine ist.

[0004] Werden für einen Lastpunkt mehrere Betriebsparameter, beispielsweise Einspritzzeitpunkt, Zündzeitpunkt, Kraftstoffdruck, Saugrohrdruck, Abgasrückführrate etc., gleichzeitig verstellt, so ergibt sich eine äußerst große Anzahl an möglichen Parameterkombinationen, welche einzeln in Betriebsmessungen an einer zu prüfenden Maschine überprüft werden müssten. Dies würde allerdings einen erheblichen Messaufwand verursachen.

[0005] Werden pro Betriebsparameter beispielsweise auch nur zehn verschiedene Werte untersucht, müssten bei zwei Betriebsparametern 100, bei drei Betriebsparametern 1000, bei vier Betriebsparametern 10.000 und bei fünf Betriebsparametern 100.000 Testpunkte angefahren werden. Dieser Aufwand ist in der Praxis nicht durchführbar. Um den Messaufwand auf ein erträgliches Maß zu reduzieren, werden mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung charakteristische Testpunkte aus der Gesamtmenge eines Versuchsraums ausgewählt, beispielsweise mittels eines sogenannten Center Composite Designs. Hierdurch lässt sich der Messaufwand wesentlich reduzieren, beispielsweise von einer Messung von 8.000 Testpunkten auf 50 Testpunkte.

[0006] Um den Messaufwand auf ein realistisches Maß zu beschränken, wird im Allgemeinen eine nach bestimmten Randbedingungen ausgewählte Anzahl von repräsentativen Testpunkten anhand eines mathematischen Modells ausgewählt.

[0007] Die Auswahl der Testpunkte erfolgt üblicherweise nach statistischen Methoden, wobei je nach Zielsetzung und Fragestellung der Analyse eine bestimmte Auswahlstrategie zur Anwendung kommt. Diese Vorgehensweise ist als statistische Versuchsplanung (Englisch: design of experiments) bekannt. Siehe hierzu beispielsweise: „Statistische Versuchsplanung und- auswertung“, Eberhard Schäffler, Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1997.

[0008] Gemäß der jeweiligen Auswahlstrategie werden Messpunkte entweder gleichmäßig in einem mehrdimensionalen Raum nach einem Modell verteilt und/oder nach bestimmten Randbedingungen gewichtet.

[0009] Kalibrierungsverfahren unter dem Einsatz von statistischer Versuchsplanung basieren im Allgemeinen auf empirischen, zeitinvarianten Modellen, die mit einem Datensatz aus stationären Messungen parametrisiert werden und dann optimiert und wiederum mit stationären Messungen verifiziert werden.

[0010] Die Erfassung von stationären Messungen ist jedoch relativ zeitaufwändig und daher ineffizient. Eine Analyse von Testfelddaten ergab eine Zeitdauer von durchschnittlich etwa 4 Minuten pro Testpunkt bei stationärer Messung. Diese 4 Minuten bestehen aus der Zeit, die Betriebsparameter auf einen neuen Testpunkt einzustellen, eine Veränderung der Betriebsparameter zu überprüfen, einem Betriebsgrenzen-Handling, einer Stabilisierung, einem Mittelwert und einem sogenannten Screenback zum Startpunkt - und all dies zur Messung eines einzelnen Testpunkts.

[0011] Die Auswahl der Testpunkte erfolgt bei der statistischen Versuchsplanung darüber hinaus in Unkenntnis der tatsächlichen Betriebsgrenzen nach rein statistischen Kriterien. Daher liegt, in Abhängigkeit des jeweils angewendeten statistischen Versuchsplans, ein Teil der ausgewählten Testpunkte außerhalb des Betriebsbereichs der Maschine.

[0012] Die Testpunkte außerhalb des Betriebsbereichs bzw. nicht-fahrbare Testpunkte können bei einer Analyse und zum Kalibrieren der Steuerung einer Maschine oder auch zur Modellbildung im Rahmen einer modellbasierten Kalibrierung nicht berücksichtigt werden, da keine Messungen für die Testpunkte vorliegen. Durch das Fehlen von Testpunkten bzw. Messungen an diesen Testpunkten wird die Aussagequalität der Analyse und damit die Qualität einer Kalibrierung nachteilig beeinflusst.

[0013] Ein Fehlen von Testpunkten, welche im nicht-fahrbaren Messbereich liegen, und damit eine Reduzierung der Datenbasis könnte grundsätzlich verhindert werden, indem vor der Anwendung des statistischen Versuchsplans die Betriebsgrenzen der Maschine für den jeweiligen Lastpunkt ermittelt werden würden und dann der Versuchsplan so angepasst wird, dass der gesamte fahrbare Raum ausgefüllt wird. Diese Vorgehensweise scheidet aber aufgrund des dafür nötigen hohen Messaufwands aus.

[0014] Aus dem Stand der Technik ist eine Reihe von Verfahren zur Verstellung der Betriebsparameter bekannt, um Messungen zu generieren, welche zur Kalibrierung der Steuerung einer Maschine eingesetzt werden können.

[0015] Beispielsweise beschäftigt sich das Dokument DE 101 56 557 B4 mit der Verletzung von Betriebsgrenzen. Dieses offenbart ein Verfahren zur Kalibrierung der Steuerung einer Maschine, insbesondere einer Brennkraftmaschine, wobei für zumindest einen Lastpunkt die Sensitivität verschiedener Betriebsparameter analysiert wird und unter Anwendung eines statistischen Versuchsplans für ausgewählte Messpunkte mit vorbestimmten Betriebsparametern Betriebsmessungen an der Maschine durchgeführt werden, wobei für zumindest einen nicht-fahrbaren Messpunkt Hilfsmesspunkte definiert werden, welche auf einer Verbindungslinie zwischen einem stabilen zentralen Messpunkt innerhalb der Betriebsgrenzen der Maschine und dem Messpunkt liegen, und dass der der Betriebsgrenze am nächsten liegende fahrbare Hilfsmesspunkt als Ersatzmesspunkt den weiteren Betriebsmessungen zugeführt wird.

[0016] Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und System zur Analyse und/oder zum Kalibrieren einer Maschine bereitzustellen, welche eine verbesserte Analyse, insbesondere einen höheren Informationsgehalt, des untersuchten Betriebsraums, insbesondere im Bereich der Betriebsgrenzen, bereitstellen, ohne den zeitlichen Aufwand einer Analyse zu erhöhen.

[0017] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren und System gemäß der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen werden in den Unteransprüchen beansprucht.

[0018] Ein erster Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine, insbesondere einer Brennkraftmaschine, einer Brennstoffzelle oder einer elektrischen Maschine, wobei Testpunkte, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgesucht sind, angefahren werden, wobei beim Anfahren der Testpunkte jeweils wenigstens ein Betriebsparameter in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt zum nächsten Testpunkt verändert wird, wobei Betriebsmessungen an Messpunkten, welche sich durch eine jeweilige Schrittweite ergeben, und an den eigentlichen Testpunkten durchgeführt werden, wobei Messdaten aus den Betriebsmessungen zur Analyse und Kalibrierung der Steuerung ausgegeben und kontinuierlich gespeichert werden.

[0019] Ein zweiter Aspekt der Erfindung betrifft ein System zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine, insbesondere einer Brennkraftmaschine, aufweisend:

einen Prüfstand zum Anfahren von Testpunkten, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgesucht sind,

Mittel zum Anfahren der Testpunkte, eingerichtet zum Verändern jeweils wenigstens eines Betriebsparameters in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt zum nächsten Testpunkt, Sensoren zum Durchführen von Betriebsmessungen an Messpunkten, welche sich durch eine jeweilige Schrittweite ergeben, und an den eigentlichen Testpunkten, und eine Datenschnittstelle zum Ausgeben von Messdaten aus den Betriebsmessungen, auf deren Grundlage die Maschine analysiert und die Steuerung kalibriert wird, und einen Datenspeicher, eingerichtet zum kontinuierlichen Speichern der Messdaten. Ein Betriebsbereich im Sinne der Erfindung ist vorzugsweise ein mehrdimensionaler Raum, welcher durch die Betriebsparameter aufgespannt wird und durch vorgegebene Wertebereiche der Betriebsparameter begrenzt wird. Vorzugsweise werden die Wertebereiche durch den stabilen Betriebsbereich der Maschine vorgegeben. Weiter vorzugsweise wird die Maschine oder ein System, welches mit der Maschine im Funktionszusammenhang steht, beispielsweise eine Abgasnachbehandlungseinrichtung, außerhalb des Betriebsbereichs beschädigt.

[0020] Messdaten im Sinne der Erfindung weisen vorzugsweise Werte der in den Betriebsmessungen gemessenen bzw. beobachteten Parameter bzw. Größen und/oder der eingestellten Parameter bzw. Größen auf.

[0021] Kontinuierlich im Sinne der Erfindung bedeutet vorzugsweise fortlaufend über einen Zeitraum, insbesondere über den Zeitraum des Anfahrens von Testpunkten, insbesondere aller Testpunkte. Vorzugsweise werden alle aufgenommenen Betriebsparameter mit der gleichen Sampling-Rate gespeichert. Liegen unterschiedliche Messfrequenzen vor, so wird entweder der kleinste gemeinsame Nenner zur Speicherung genommen, oder alle Messwerte werden so verarbeitet, dass eine Speicherung mit einer festen Sampling-Rate möglich ist, beispielsweise 1Hz; vorzugsweise werden die Signale der Betriebsparameter hierfür gefiltert, beispielsweise mittels eines laufenden Mittelwerts. Hierdurch können beispielsweise Aliasing-Effekte vermieden werden.

[0022] Ausgeben im Sinne der Erfindung bedeutet vorzugsweise Bereitstellen an einer Schnittstelle, insbesondere einer Benutzerschnittstelle oder einer Datenschnittstelle.

[0023] Die Erfindung beruht auf dem Ansatz, nicht nur an den eigentlichen, mittels des statistischen Versuchsplans ausgewählten Testpunkten Informationen über die untersuchte Maschine zu erzeugen, sondern auch jene Information, die während des Einstellens des jeweiligen Testpunkts generiert wird, aufzuzeichnen und damit für die Analyse einer Maschine und die Kalibrierung der Steuerung dieser Maschine nutzbar zu machen.

[0024] Erfindungsgemäß sind zwar, wie im Stand der Technik, die eigentlichen Testpunkte mittels statistischer Versuchsplanung berechnet bzw. ausgewählt, die Messmethodik beruht aber auf einem Screening-Verfahren, welches zwischen den einzelnen Testpunkten angewendet wird. Mithin werden die Testpunkte durch Messrampen miteinander verbunden, bei welchen die Betriebsparameter schrittweise von einem Testpunkt zum nächsten Testpunkt verändert werden und Messdaten sowohl bei jedem Schritt als auch an den Messpunkten selbst erhoben werden.

[0025] Vorzugsweise kann als Screening-Methode hierbei eine sogenannte Slow Dynamic Slopes-Methode zum Einsatz kommen (im Folgenden SDS genannt). Das bedeutet, dass die Verstellung der Betriebsparameter, welche die Rampen ergibt, so langsam vorgenommen wird, dass die aufgezeichneten Messdaten als quasi-stationär gelten können. Hierfür werden vorzugsweise die Verstellzeiten zwischen einzelnen Schritten bzw. die Rampenzeiten auf Zeitkonstanten der Betriebsgrößen, insbesondere der beobachteten Ausgangsgrößen, angepasst. Es hat sich gezeigt, dass zur Vermessung eines Versuchsplans keine zusätzlichen stationären Messungen durchgeführt werden müssen.

[0026] Zur allgemeinen Funktionsweise der SDS-Methode wird auf folgende Veröffentlichungen verwiesen: „Methodology for Efficient Calibration of Model Based ECU Structures“, Leithgöb, R., Bollick, M., Büchel, M., Henzinger, F., International Symposium on Development Methodology, Wiesbaden, 2005; „Methode zur schnellen Basisbedatung von Motorsteuerungen“, Büchel, M., Thomas, M., International Symposium on Development Methodology, Wiesbaden, 2009.

[0027] Vergleichsversuche haben gezeigt, dass durch das erfindungsgemäße Verfahren eine

wesentliche Reduzierung der Dauer zur Vermessung eines Testpunkts gegenüber einem traditionellen Messverfahren erreicht werden kann, insbesondere eine Reduzierung von bis zu ca. 2/3 der Dauer.

[0028] Des Weiteren werden durch das erfindungsgemäße Verfahren während dieser Dauer wesentlich mehr Messdaten erzeugt, so dass eine genauere Analyse eines Betriebsverhaltens der Maschine möglich ist und auch für eine Modellbildung eine bessere, weit dichtere Datenbasis vorhanden ist.

[0029] Schließlich sind die mittels der Erfindung aufgezeichneten Messdaten aufgrund der Vielzahl an Messwerten für verschiedene Kalibrieraufgaben nutzbar. Dies beruht darauf, dass auch Messpunkte zwischen den eigentlichen Testpunkten aufgenommen werden, so dass sich eine mehr oder weniger vollständige Charakterisierung des Versuchsraums ergibt. Mithin können andere Kalibrierungsaufgaben als jene, für die das Verfahren ursprünglich durchgeführt wurde, auf der Grundlage des Datensatzes durchgeführt werden, oder dieser Datensatz kann zumindest eine Messung für eine andere Kalibrierungsaufgabe ergänzen oder deren Grundlage bilden.

[0030] Vorzugsweise wird das erfindungsgemäße Verfahren Computer-gestützt ausgeführt. Entsprechend betreffen zwei weitere Aspekte der Erfindung ein Computerprogramm, das Anweisungen umfasst, welche, wenn sie von einem Computer ausgeführt werden, diesen dazu veranlassen, die Schritte des Verfahrens auszuführen, und ein Computer-lesbares Medium, auf dem ein solches Computerprogramm gespeichert ist.

[0031] In einer vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird eine Veränderung des wenigstens einen Betriebsparameters so langsam durchgeführt und/oder Schrittweiten werden so klein gewählt, dass die Maschine in einem quasi-stationären Betrieb betrieben wird.

[0032] Entsprechend werden in einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens Betriebsmessungen kontinuierlich durchgeführt, wobei vorzugsweise vor einem Messabschnitt, in welchem Betriebsmessungen durchgeführt werden, kein gesonderter Stabilisierungsabschnitt vorgesehen ist, in welchem der wenigstens eine Betriebsparameter konstant gehalten wird.

[0033] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens ist der zeitliche Verlauf des Veränderens des wenigstens einen Betriebsparameters in Schritten rampenförmig, insbesondere in Bezug auf die Zeit und/oder eine zurückgelegte Strecke. Hierdurch liegen die Messpunkte vorzugsweise auf einer Linie. Hierdurch lässt sich eine besonders systematische Vermessung des Versuchsraums realisieren.

[0034] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird bei einer Grenzwert-Überschreitung einer Betriebsgrenze eines mittels der Betriebsmessung beobachteten Betriebsparameters ein Anfahren des nächsten Testpunkts abgebrochen und ein vorhergehender Testpunkt, ein vordefinierter sicherer Betriebspunkt oder ein dem Testpunkt nachfolgender Testpunkt angefahren. Durch diese Behandlung von Grenzwertüberschreitungen kann das Messverfahren ohne Unterbrechung fortgesetzt werden und weitere Messwerte in Bezug auf den zu analysierenden Versuchsraum liefern. Eine separate Methodik zur Identifizierung eines Hilfsmesspunkts an der Betriebsgrenze, wie in dem eingangs genannten Dokument DE 101 56 557 B4 beschrieben, ist nicht notwendig. Hierdurch wird Messzeit eingespart und das Messverfahren wird insgesamt vereinfacht.

[0035] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens werden die Messdaten statistischen oder mathematischen Auswertungsmethoden oder Modellbildungsalgorithmen zugeführt. Beispielsweise können die Messdaten einem künstlichen neuronalen Netz, einem Random Forest-Algorithmus, einem Interpolationsverfahren, einem polynomialen Modellbildungsalgorithmus, etc. zugeführt werden. Zum einen kann hierdurch das für die Auswahl der Testpunkte verwendete Modell der statistischen Versuchsplanung kontinuierlich angepasst werden, zum anderen kann ein Modell für eine Modell-basierte Optimierung nach und nach verbessert werden.

[0036] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird ein Modell mittels des Modellbildungsalgorithmus und/oder einem Versuchsraum, insbesondere kontinuierlich, während

eines Ausführens des Verfahrens angepasst. Auch hierdurch können im Rahmen einer Modellbasierten Optimierung bzw. Kalibrierung weitere Grenzwertüberschreitungen verhindert werden und mithin eine effizientere Versuchsdurchführung erreicht werden.

[0037] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird ein mittels des Modellalgorithmus gebildetes oder verändertes Modell zur Berechnung einer optimierten Kalibrierung der Steuerung herangezogen. Hierdurch kann im Rahmen einer Modellbasierten Optimierung eine iterative Optimierung der Steuerung der Maschine erreicht werden.

[0038] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens wird das Modell der Maschine oder der Kalibrierung der Steuerung mit weiteren Betriebsmessungen verifiziert. Hierdurch können die mittels des Verfahrens gefundenen Werte auf ihre Richtigkeit in Bezug auf die zu untersuchende Maschine geprüft werden.

[0039] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens sind die Messdaten für verschiedene Kalibrieraufgaben nutzbar, wobei aus den zur Verfügung stehenden aufgezeichneten Messdaten für jede Kalibrieraufgabe unterschiedliche Eingangs- und/oder Ausgangsgrößen ausgewählt werden können.

[0040] Durch das Auswählen der unterschiedlichen Eingangs- und/oder Ausgangsgrößen können verschiedenste Kalibrieraufgaben auf der Grundlage der aufgezeichneten Messdaten durchgeführt werden.

[0041] Die im Vorhergehenden in Bezug auf den ersten Aspekt der Erfindung erläuterten Vorteile und Merkmale gelten entsprechend auch für die übrigen Aspekte der Erfindung und umgekehrt.

[0042] Weitere Vorteile und Merkmale ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen in Bezug auf die Figuren. Es zeigen wenigstens teilweise schematisch:

[0043] Fig. 1 ein Blockdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine;

[0044] Fig. 2 eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels eines Systems zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine;

[0045] Fig. 3a und 3b Diagramme des Verlaufs von Eingangsparametern bzw. Ausgangsparametern von Betriebsmessungen bei einem Verfahren zur Kalibrierung des Stands der Technik;

[0046] Fig. 4 ein weiteres Diagramm von Eingangs- und Ausgangsparametern von mittels des Verfahrens zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine ausgeführten Betriebsmessungen;

[0047] Fig. 5 verschiedene Diagramme mit Messverläufen, welche mittels des Verfahrens zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine aufgezeichnet wurden; und

[0048] Fig. 6 ein Diagramm nach Fig. 4, wobei verschiedene Verzögerungszeiten für einen mittels eines Modells bestimmten Ausgangsparameter und einen gemessenen Ausgangsparameter gezeigt werden.

[0049] Im Nachfolgenden werden die Ausführungsbeispiele in Bezug auf eine Brennkraftmaschine 1 dargestellt. Es ist für den Fachmann jedoch offensichtlich, dass die beschriebene Lehre auch auf andere Maschinen übertragbar ist, insbesondere Antriebsmaschinen, wie Elektromotoren.

[0050] Fig. 1 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Verfahrens 100 zum Kalibrieren einer Steuerung einer Maschine 1.

[0051] Der Arbeitsablauf, in welchen das Verfahren 100 zum Kalibrieren einer Steuerung eingebunden ist, ist vorzugsweise wie folgt:

[0052] Zunächst wird der durchzuführende Test bzw. Versuch definiert. Es wird vorzugsweise

festgelegt, was die einzustellenden bzw. die zu verändernden Eingangsparameter sind und welche Ausgangsparameter aufgezeichnet werden sollen. Es wird festgelegt, in welchen Umgebungsbedingungen der Test durchgeführt werden soll, zum Beispiel mit welcher Temperatur des Kühlmittels. Auch wird vorzugsweise festgelegt, welche Ausgangsparameter in Bezug auf Betriebsgrenzen Lim überwacht werden müssen und wo die Grenzwerte Lim liegen. Ausgehend hiervon werden Verstellbereiche für die Eingangsparameter P_1 festgelegt, und darüber hinaus wird vorzugsweise anhand dieser Eckdaten ein raumfüllendes Design (Engl: space-filling design) erzeugt.

[0053] Auf der Grundlage der Definition des Tests und des raumfüllenden Designs wird mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans vorzugsweise ein Testplan erstellt.

[0054] Dieser Testplan weist eine Vielzahl an Testpunkten auf. Testpunkte werden hierbei durch eine Vielzahl von Betriebsparametern P bzw. deren Werte definiert, und auch bei dem Versuchsraum handelt es sich, durch die Vielzahl an Betriebsparametern, um einen vieldimensionalen Versuchsraum.

[0055] Die Testpunkte werden üblicherweise im Prüfstandsbetrieb, zum Beispiel an einem Motorenprüfstand, einem Antriebsstrangprüfstand oder einem Rollenprüfstand, vermessen. Im Allgemeinen kommen hierfür sogenannte stationäre Prüfstände zum Einsatz.

[0056] Anzufahrende Testpunkte werden eingeregelt. Ist der Testpunkt erreicht, wird gewartet, bis sich der Betrieb der Brennkraftmaschine stabilisiert und sobald während dieser Stabilisierungsphase STAB nur noch geringfügige oder keine Änderung im Betrieb der Brennkraftmaschine auftreten, wird eine Messung in der Messphase MEAS durchgeführt. Ein solcher Ablauf ist ganz allgemein in Fig. 3a dargestellt.

[0057] An dieser Stelle setzt vorzugsweise das Verfahren 100 zum Kalibrieren an.

[0058] Ähnlich wie bei Verfahren zum Kalibrieren im Stand der Technik werden in dem Verfahren 100 die Testpunkte angefahren 101. Hierbei wird wenigstens ein Betriebsparameter P_1 , welcher ein Stellparameter ist, in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt T_n zum nächsten Testpunkt T_{n+1} verändert.

[0059] In der Praxis werden hierbei üblicherweise mehrere Betriebsparameter P_1 entweder gleichzeitig oder hintereinander verstellt. Die Verstellung erfolgt hierbei vorzugsweise so langsam und/oder mit so geringen Schrittweiten, dass sich die Brennkraftmaschine 1 in einem quasi-stationären Betriebszustand befindet.

[0060] Betriebsmessungen werden dabei sowohl bei jenen Wertekonstellationen, welche sich nach jedem Schritt durch die für jeden Betriebsparameter P eingestellte Schrittweite ergeben, im Folgenden Messpunkte M_n genannt, als auch an den eigentlichen Testpunkten T_n, T_{n+1}, T_{n+2} , welche aus der Auswahl mittels der statistischen Versuchsplanung stammen, durchgeführt.

[0061] Da die Brennkraftmaschine 1 während des Verstellvorgangs der Eingangsparameter P_1 in einem quasi-stationären Betriebszustand gehalten wird, sind vorzugsweise weder vor den nach dem Vermessenen der Messpunkte M_n noch vor oder nach dem Vermessen der Testpunkte T_n, T_{n+1}, T_{n+2} Stabilisierungszeiträume STAB vorgesehen, wie dies im Stand der Technik der Fall ist. Auch die Einstellphase SET kann mithin in die Messphase MEAS mit einbezogen werden.

[0062] Die Messphase MEAS des Verfahrens 100 kann sich somit über einen wesentlich größeren Zeitabschnitt erstrecken, als bei den klassischen Verfahren zum Kalibrieren des Stands der Technik. Vorzugsweise erstreckt sich die Messphase MEAS über die gesamte Dauer des Verfahrens 100, weiter vorzugsweise ohne Unterbrechung.

[0063] Die Messdaten aus den Betriebsmessungen, welche im Weiteren zur Analyse und Kalibrierung der Steuerung verwendet werden können, werden schließlich ausgegeben und kontinuierlich gespeichert 103.

[0064] Aufgrund der Vielzahl an Messungen bzw. der dichten Messdaten, welche mit dem Verfahren 100 erzeugt werden, können die Messdaten nicht nur für jene Kalibrierungsaufgabe, welche für

diese erhoben wurden, genutzt werden. Vielmehr können diese auch für andere Kalibrieraufgaben verwendet werden, sofern die hierfür notwendigen Betriebsgrößen mit vermessen wurden.

[0065] Die gespeicherten Messdaten werden vorzugsweise statistischen und/oder mathematischen Auswertungsmethoden zugeführt 104. Insbesondere wird mit diesen Methoden eine Modellbildung vorgenommen. Vorzugsweise ist dies ein Modell der Brennkraftmaschine, des Antriebsstrangs oder des gesamten Fahrzeugs, mit welchem die jeweils modellierte Komponente simuliert werden kann. Vorzugsweise handelt es sich bei dem Modell um ein sogenanntes künstliches neuronales Netz, welches auf der Grundlage der Messdaten trainiert wird. Es können jedoch auch andere Methoden des maschinellen Lernens zum Einsatz kommen, genauso wie Polynommodelle oder Gauß-Modelle, etc. Weiter vorzugsweise wird bei der Modellbildung eine Verzögerungszeit der Signale bis zur Messung berücksichtigt. Dies wird weiter unten in Bezug auf Fig. 6 erläutert. Die Modelle können vorzugsweise oder aus einer Bibliothek von bestehenden Beispielmustern ausgesucht werden, in welchen Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern P_1 und Ausgangsparametern P_2 grob angelegt sind.

[0066] Vorzugsweise werden diese Modelle laufend bzw. kontinuierlich verifiziert und während des Ausführens des Verfahrens 100 angepasst 105.

[0067] Anhand dieser Modelle kann eine numerische Optimierung vorgenommen werden, um die Kalibrierung der Steuerung zu verbessern. Vorzugsweise kann eine solche optimierte Kalibrierung schon während der Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens 100 rückgekoppelt werden, indem die statistische Versuchsplanung wiederholt wird bzw. indem bei der statistischen Versuchsplanung die Kenntnisse über die optimierte Kalibrierung bereits berücksichtigt werden 106.

[0068] Weiter vorzugsweise wird eine optimierte Kalibrierung schließlich mit weiteren Betriebsmessungen verifiziert 107.

[0069] Fig. 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel eines Systems zum Kalibrieren einer Steuerung einer Brennkraftmaschine 1.

[0070] Die Brennkraftmaschine 1 ist dabei vorzugsweise auf einem Prüfstand 11 angeordnet und weiter vorzugsweise über eine Welle 4, welche zur Brennkraftmaschine 1 oder zum Prüfstand 11 gehört, mit einem Dynamometer 3 drehfest verbunden.

[0071] Der Dynamometer 3 ist vorzugsweise eingerichtet, um eine Last auf die Brennkraftmaschine 1 aufzubringen. Des Weiteren weist der Prüfstand 11 Sensoren 13a, 13b, 13c auf, um Betriebsgrößen der Brennkraftmaschine 1 aufzunehmen. Im vorliegenden Fall könnte der Sensor 13a beispielsweise die Drosselklappenstellung aufnehmen, der Sensor 13b ein Drehmoment, welches an der Welle 4 und damit an der Brennkraftmaschine 1 anliegt, und der Sensor 13c eine Leistung, welche aufgewendet wird, um mittels des Dynamometers 3 die Welle 4 und damit die Brennkraftmaschine 1 zu bremsen.

[0072] Messwerte werden vorzugsweise über eine Datenschnittstelle 14 des Systems 10 zum Ausgeben von Messdaten aus den Betriebsmessungen an einen Datenspeicher 15 oder direkt an Mittel 12 zum Anfahren der Testpunkte T_n , T_{n+1} , T_{n+2} ausgegeben.

[0073] Mittel 12 zum Anfahren der Testpunkte berechnen auf der Grundlage eines statistischen Versuchsplans und/oder der bereits generierten Messdaten die Werte der Eingangsparameter P_1 und geben diese an eine Steuerung 2 der Brennkraftmaschine 1 weiter. Die Steuerung stellt die Eingangsparameter P_1 als Sollwerte an der Brennkraftmaschine 1 ein.

[0074] Figuren 3a und 3b zeigen zwei Diagramme des Messverlaufs eines klassischen Verfahrens zur Kalibrierung.

[0075] Das Diagramm der Fig. 3a stellt hierbei den Verlauf des Eingangsparameters P_1 der Steuerung einer Brennkraftmaschine, d.h. der eingestellten Größe, und den dazugehörigen Verlauf des Ausgangsparameters P_2 , d.h. der beobachteten Größe, in Abhängigkeit der Zeit, dar. Fig. 3b stellt nochmals ein Diagramm des Verlaufs des Ausgangsparameters P_2 in Abhängigkeit des Eingangsparameters P_1 bzw. der eingestellten Größe dar, in jenem Bereich, in dem eine Grenzwert-

verletzung des Ausgangsparameters P_2 auftritt.

[0076] In Fig. 3a wird, nachdem ein Testpunkt T_n vermessen ist, der Eingangsparameter P_1 schrittweise auf den Wert des nachfolgenden Testpunkt T_{n+1} gebracht. Dieser Abschnitt des Messverfahrens ist eine Einstellphase SET, in welchem der Eingangsparameter P_1 bzw. mehrere Eingangsparameter auf den nächsten Testpunkt T_{n+1} eingestellt werden, welcher mittels eines statistischen Versuchsplans ermittelt wurde.

[0077] Im dargestellten Fall tritt bei t_1 eine Grenzwertverletzung der Betriebsgrenze Lim des Ausgangsparameters P_2 auf. Infolgedessen kann der Eingangsparameter P_1 nicht auf den angesteuerten Testpunkt T_{n+1} eingestellt werden.

[0078] Der Eingangsparameter P_1 wird infolgedessen zurückgestellt, bis die Grenzwertverletzung des Ausgangsparameters P_2 aufgehoben ist. Aufgrund einer Hysterese oder einer Zeitverzögerung des Ausgangsparameters dauert dies, wie aus Fig. 3a ersichtlich ist, einige Zeit, und der Eingangsparameter P_1 muss weit unter den Wert, bei welchem die Grenzwertverletzung auftrat, zurückgenommen werden.

[0079] In einem nächsten Verfahrensschritt wird der Eingangsparameter P_1 wieder in jede Richtung verstellt, in welcher die Grenzwertverletzung auftrat, allerdings mit reduzierter Schrittweite. Tritt dort keine Grenzwertverletzung auf, so schließt sich im Zeitpunkt t_2 eine Stabilisierungsphase STAB an, in welcher gewartet wird, bis sich der Motor in einem stationären Betrieb befindet und nur noch eine geringe oder sogar keine Veränderung des Ausgangsparameters P_2 mehr beobachtet werden kann. Ist dies der Fall, schließt sich vom Zeitpunkt t_3 bis zum Zeitpunkt t_4 ein Abschnitt des Messverfahrens an, in welchem eine Messung MEAS durchgeführt wird. Hierbei wird ein Hilfstestpunkt $T_{n+1'}$ vermessen.

[0080] Wie in Fig. 3b gezeigt, wird in einem Bereich, in welchem der Ausgangsparameter P_2 eine starke Schwankung bzw. einen hohen Gradienten in Bezug auf eine Veränderung des Eingangsparameters P_1 aufweist, nur eine einzige Messung eines Hilfstestpunkts $T_{n+1'}$ vorgenommen. Gerade in einem Bereich starker Veränderungen wären jedoch eine Vielzahl an Messpunkten von Vorteil, um die Abhängigkeit des Ausgangsparameters P_2 von dem Eingangsparameter P_1 genau analysieren zu können und entsprechend bei der Modellbildung berücksichtigen zu können. Dies ist auch deswegen von besonderer Bedeutung, da Optima bei der Kalibrierung von Brennkraftmaschinen oftmals in der Nähe von Betriebsgrenzen Lim angeordnet sind.

[0081] Fig. 4 zeigt zum Vergleich ein Diagramm eines Messverlaufs des Verfahrens 100 zur Kalibrierung.

[0082] Auch hier werden nach Vermessen eines Testpunkts T_n , welcher mittels eines statistischen Versuchsplans ausgewählt ist, ein nachfolgender Testpunkt T_{n+1} durch Verstellung des wenigstens einen Eingangsparameters P_1 angefahren. Im Gegensatz zu dem klassischen Messablauf werden bei dem Verfahren 100 jedoch kleinere Schritte ausgeführt und/oder der nachfolgende Testpunkt T_{n+1} mit einer geringeren Verstellgeschwindigkeit des Eingangsparameters P_1 angefahren. Dadurch wird die Brennkraftmaschine 1 in einem quasi-stationären Betriebszustand gehalten.

[0083] Betriebsmessungen können bei dem Verfahren 100 daher nicht nur an den Testpunkten T_n , T_{n+1} durchgeführt werden, sondern auch an Messpunkten M_n , welche sich durch eine Schrittweite der Verstellung des Eingangsparameters P_1 ergeben.

[0084] In Fig. 4 sind diese Messpunkte M_n durch Kreuze auf der Linie dargestellt, welche den Testpunkt T_n mit dem nächsten Testpunkt T_{n+1} verbindet. Vorzugsweise wird hierbei ein Messpunkt M_n nach jedem Verstellschritt des Eingangsparameters P_1 aufgenommen. Es ist jedoch auch möglich, Betriebsmessungen nur nach mehreren Schritten durchzuführen.

[0085] Wie auch bei dem klassischen Messverfahren nach Fig. 3a, erreicht der Ausgangsparameter P_2 am Zeitpunkt t_1 im dargestellten Fall eine Betriebsgrenze Lim . Entgegen dem klassischen Messverfahren wird bei dem Verfahren 100 aber nicht versucht, den Eingangsparameter P_1 zurückzunehmen und sich dann wieder in der ursprünglichen Verstellrichtung des Eingangsparameters

rameters P_1 der Betriebsgrenze Lim des Ausgangsparameters P_2 zu nähern. Vielmehr fährt das Verfahren 100 den nächsten Testpunkt T_{n+2} , welcher ebenfalls mittels des statistischen Versuchsplans ermittelt ist, an. Auch hierbei werden nach jedem Verstellschritt des Eingangsparameters P_1 oder auch nach mehreren Verstellritten Betriebsmessungen an Messpunkten M_n ausgeführt. Alternativ kann nach der Grenzwertverletzung bei t_1 auch der vorherige Testpunkt T_n oder auch ein vordefinierter sicherer Betriebspunkt, d.h. ein Betriebspunkt, von welchem bekannt ist, dass dieser im fahrbaren Bereich des Versuchsraums liegt, angefahren werden.

[0086] Die Gesamtheit der aufgenommenen Messpunkte M_n in Fig. 4 ist mit einer geschweiften Klammer gekennzeichnet. Wie aus Fig. 4 ebenfalls ersichtlich ist, ist die Messdauer MEAS, welche vorzugsweise während des gesamten Messverfahrens andauert, wesentlich länger als bei dem klassischen Ansatz in Fig. 3a.

[0087] Im Wesentlichen können bei dem Verfahren 100 Messungen während des gesamten Verstellvorgangs des Eingangsparameters P_1 vorgenommen werden. Hierdurch ergibt sich eine wesentlich höhere Informationsdichte in der Messphase MEAS. Die Messphase MEAS dauert vorzugsweise vom Verlassen eines Testpunkte T_n bis zum Erreichen der Betriebsgrenze Lim und wiederum zum Anfahren eines nächsten Testpunkte T_{n+1} , T_{n+2} an und ist, wie aus einem Vergleich der Diagramme gemäß Fig. 3a und Fig. 4 ersichtlich ist, dabei sogar kürzer als eine einzige Messungen des Ersatztestpunkts T_{n+1} in Fig. 3a.

[0088] Fig. 5 zeigt eine Reihe von Diagrammen, in welchen jeweils der zweidimensionale Versuchsraum gezeigt ist, welcher durch die jeweils an der Abszisse horizontal angegebenen Betriebsgrößen Drosselklappe, Waste Gate-Position, Nockenwellenposition-Einlass und Nockenwellenposition-Auslass als Eingangsparameter und die an der Ordinate vertikal angegeben identischen Betriebsgrößen Nockenwellenposition-Auslass, Nockenwellenposition-Einlass, Waste Gate-Position und Drosselklappe als Ausgangsparameter aufgespannt werden. Die Messungen wurden auch hier im Rahmen des Verfahrens 100 ausgeführt.

[0089] Es zeigt sich, dass die Versuchsräume durch die Messungen sehr gut abgedeckt sind. Die Messdichte ist hierbei wesentlich höher, als wenn nur die wenigen, mittels eines statistischen Versuchsplans ausgewählten Testpunkte vermessen worden wären.

[0090] Aufgrund der Dichte der Betriebsmessungen können die vermessenen Betriebsparameterpaare nicht nur für eine Kalibrierungsaufgabe verwendet werden, sondern die aufgezeichneten Betriebsmessungen lassen sich auch für andere Kalibrierungsaufgaben verwenden, bei denen die Versuchsräume vorzugsweise in etwa gleich zu den in Fig. 5 gezeigten Versuchsräumen sind.

[0091] In Bezug auf Fig. 6 wird eine Berücksichtigung einer Verzögerungszeit der Signale bei der Modellbildung beschrieben. Hierbei geht es um den Umgang mit zeitverzögerten Signalen in dem Verfahren 100. Wie bekannt ist, haben viele reale Messsignale eine Verzögerungszeit, z.B. durch Leitungslängen (wie bei Emissionsmessgeräten) oder durch Zeitverzögerungen (wie bei Temperaturmessstellen). Insbesondere reale Messsignale für Leistung und Emissionen werden mit einem einer gewissen Verzögerung gemessen. Wenn diese Messdaten (quasi-)stationär behandelt werden sollen, muss in Bezug auf diese Signale bei der Modellbildung die jeweilige Zeitverzögerung berücksichtigt werden.

[0092] Typische Verzögerungszeiten für z.B. Emissionsmessgeräte liegen im Bereich von wenigen Sekunden.

[0093] Im Rahmen des beschriebenen Ausführungsbeispiels des Verfahrens 100, entscheidet vorzugsweise der Modellbildungsalgorithmus, welche Zeitverschiebung die passendste ist. Daher werden mittels eines Modellbildungsalgorithmus verschiedene Modelle für Ausgangsparameter z.B. Emissionen mit identischer Modellstruktur aber unterschiedlichen Verzögerungszeiten des Sendesignals erstellt.

[0094] Hierfür wird jeder Vektor vorzugsweise um drei verschiedene Verzögerungszeiten x , y und z Sekunden verschoben und dann mit den empirischen Modellalgorithmen getestet, welcher Zeitverzug der passendste ist und daher die beste Modellgüte R^2 aufweist. Dieser wird dann für die

finale Datenauswertung und ggf. Optimierung herangezogen. D.h., jenes Modell, bei welchem eine simulierte Verzögerungszeit am besten mit der gemessenen Verzögerungszeit übereinstimmt, d.h. welches die beste Modellgüte R^2 aufweist, wird als Modell für die Optimierung ausgewählt.

[0095] In Figur 6 ist dies das Modell, bei welchem eine Verzögerungszeit von 4s für den Ausgangsparameter berücksichtigt ist.

[0096] Bei den im Vorhergehenden beschriebenen Ausführungsbeispielen handelt es sich lediglich um Beispiele, die den Schutzbereich, die Anwendung und den Aufbau in keiner Weise einschränken sollen. Vielmehr wird dem Fachmann durch die vorausgehende Beschreibung ein Leitfaden für die Umsetzung mindestens eines Ausführungsbeispiels gegeben, wobei diverse Änderungen, insbesondere im Hinblick auf die Funktion und Anordnung der beschriebenen Bestandteile, vorgenommen werden können, ohne den Schutzbereich zu verlassen, wie er sich aus den Ansprüchen und diesen äquivalenten Merkmalskombinationen ergibt. Insbesondere können einzelne Ausführungsbeispiele miteinander kombiniert werden.

BEZUGSZEICHENLISTE

1	Maschine
2	Steuerung
3	Dynamometer
4	Welle
10	System
11	Prüfstand
12	Mittel zum Anfahren der Testpunkte
13a, 13b, 13c	Sensoren
14	Datenschnittstelle
15	Datenspeicher
P_1	Eingangsparameter
P_2	Ausgangsparameter
T_n, T_{n+1}, T_{n+2}	Testpunkt
T_{n+1}'	Hilfstestpunkt
t_1, t_2, t_3, t_4	Zeitpunkt
M_n	Messpunkt
Lim	Betriebsgrenze

Patentansprüche

1. Verfahren (100) zur Betriebsanalyse einer Maschine (1) und/oder zum Kalibrieren einer Steuerung (2) der Maschine (1), insbesondere einer Brennkraftmaschine, wobei Testpunkte, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgesucht sind, angefahren werden (101), wobei beim Anfahren der Testpunkte jeweils wenigstens ein Betriebsparameter (P_1) in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt (T_n) zum nächsten Testpunkt (T_{n+1}) verändert wird, wobei Betriebsmessungen (meas) an Messpunkten (M_n), welche sich durch eine jeweilige Schrittweite ergeben, und an den eigentlichen Testpunkten (T_n, T_{n+1}) durchgeführt werden (102), wobei Messdaten aus den Betriebsmessungen zur Analyse und Kalibrierung der Steuerung (2) ausgegeben und kontinuierlich gespeichert werden (103).
2. Verfahren (100) nach Anspruch 1, wobei Betriebsmessungen kontinuierlich durchgeführt werden, wobei vorzugsweise vor einem Messabschnitt (meas), in welchem Betriebsmessungen durchgeführt werden, kein gesonderter Stabilisierungsabschnitt (stab) vorgesehen ist, in welchem der wenigstens eine Betriebsparameter konstant gehalten wird.
3. Verfahren (100) nach Anspruch 1 oder 2, wobei der zeitliche Verlauf des Veränderns des wenigstens einen Betriebsparameters (P) in Schritten rampenförmig ist.
4. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei einer Grenzwertüberschreitung eines mittels der Betriebsmessungen beobachteten Betriebsparameters ein Anfahren des nächsten Testpunkts (T_{n+1}) abgebrochen wird und ein vorhergehender Testpunkt (T_n), ein vordefinierter sicherer Betriebspunkt oder ein dem nächsten Testpunkt (T_{n+1}) nachfolgender Testpunkt (T_{n+2}) angefahren wird.
5. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Messdaten statistischen oder mathematischen Auswertungsmethoden oder Modellbildungsalgorithmen, insbesondere einem künstlichen neuronalen Netz, zugeführt werden (104).
6. Verfahren (100) nach Anspruch 5, wobei ein Modell mittels des Modellbildungsalgorithmus und/oder ein Versuchsraum, insbesondere kontinuierlich, während eines Ausführens des Verfahrens (100) angepasst wird (105).
7. Verfahren (100) nach Anspruch 5 oder 6, wobei ein mittels des Modellbildungsalgorithmus gebildetes oder verändertes Modell zur Berechnung einer optimierten Kalibrierung der Steuerung herangezogen wird (106).
8. Verfahren (100) nach einem der Ansprüche 5 bis 7, wobei das Modell oder die optimierte Kalibrierung der Steuerung mit weiteren Betriebsmessungen verifiziert werden (107).
9. Verfahren (100) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Messdaten für verschiedene Kalibrieraufgaben nutzbar sind, wobei aus den zur Verfügung stehenden aufgezeichneten Messdaten für jede Kalibrieraufgabe unterschiedliche Eingangs- und/oder Ausgangsgrößen ausgewählt werden.
10. Computerprogramm, das Anweisungen umfasst, welche, wenn sie von einem Computer ausgeführt werden, diesen dazu veranlassen, die Schritte eines Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9 auszuführen.
11. Computer-lesbares Medium, auf dem ein Computerprogramm nach Anspruch 10 gespeichert ist.
12. System (10) zur Betriebsanalyse einer Maschine (1) und/oder zum Kalibrieren einer Steuerung (2) der Maschine (1), insbesondere einer Brennkraftmaschine, aufweisend:
einen Prüfstand (11) zum Anfahren von Testpunkten, welche durch Werte einer Vielzahl vorbestimmter Betriebsparameter definiert und mittels eines statistischen Versuchsplans aus einem vieldimensionalen Versuchsraum ausgesucht sind,
Mittel (12) zum Anfahren der Testpunkte, eingerichtet zum Verändern jeweils wenigstens

eines Betriebsparameters (P_1) in einer Vielzahl von Schritten von einem Testpunkt (T_n) zum nächsten Testpunkt (T_{n+1});
Sensoren (13) zum Durchführen von Betriebsmessungen an Messpunkten (M_n), welche sich durch eine jeweilige Schrittweite ergeben, und an den eigentlichen Testpunkten (T_n, T_{n+1});
und
eine Datenschnittstelle (14) zum Ausgeben von Messdaten aus den Betriebsmessungen, auf deren Grundlage die Maschine (1) analysiert und die Steuerung kalibriert wird; und
einen Datenspeicher (15), eingerichtet zum kontinuierlichen Speichern der Messdaten.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

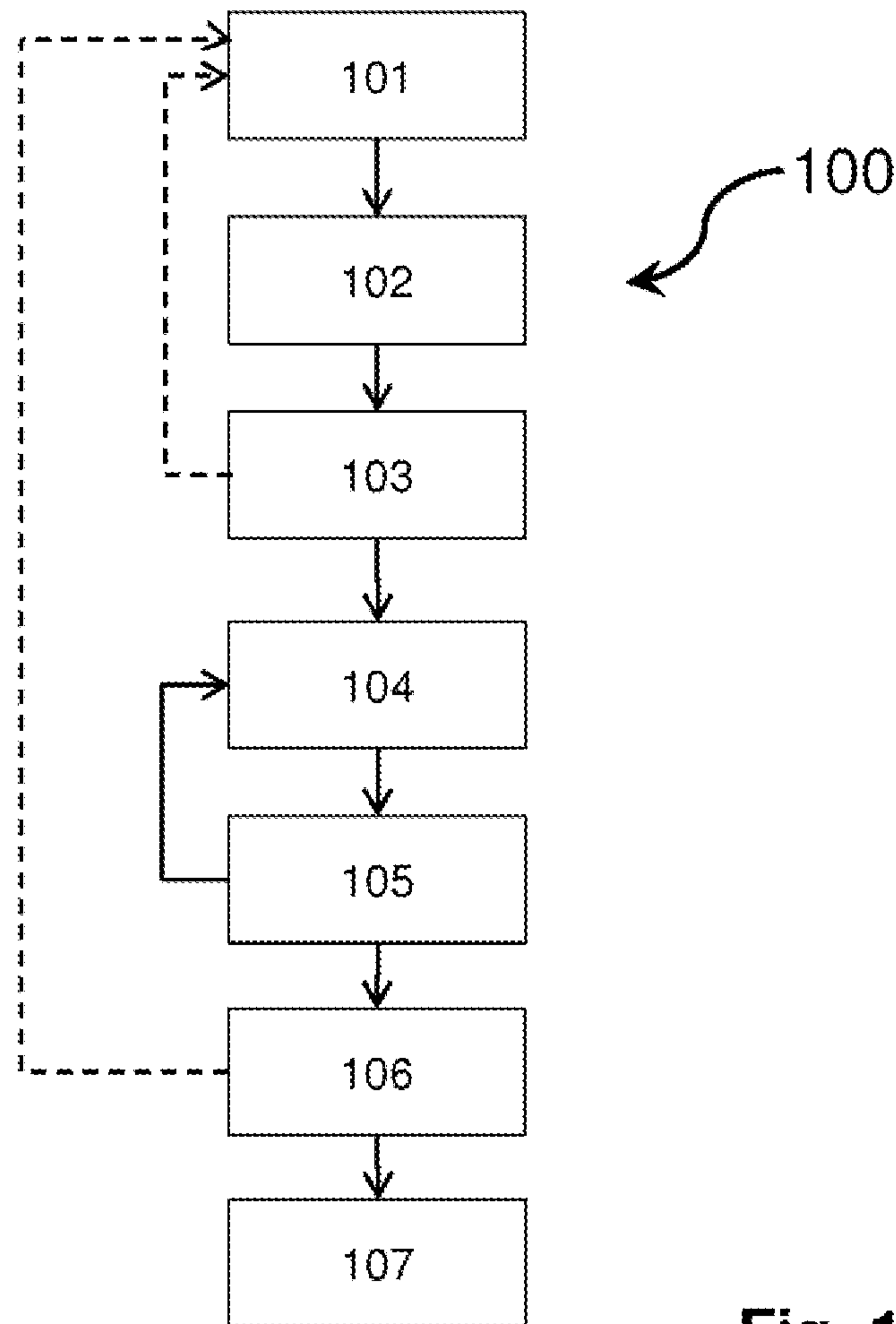


Fig. 1

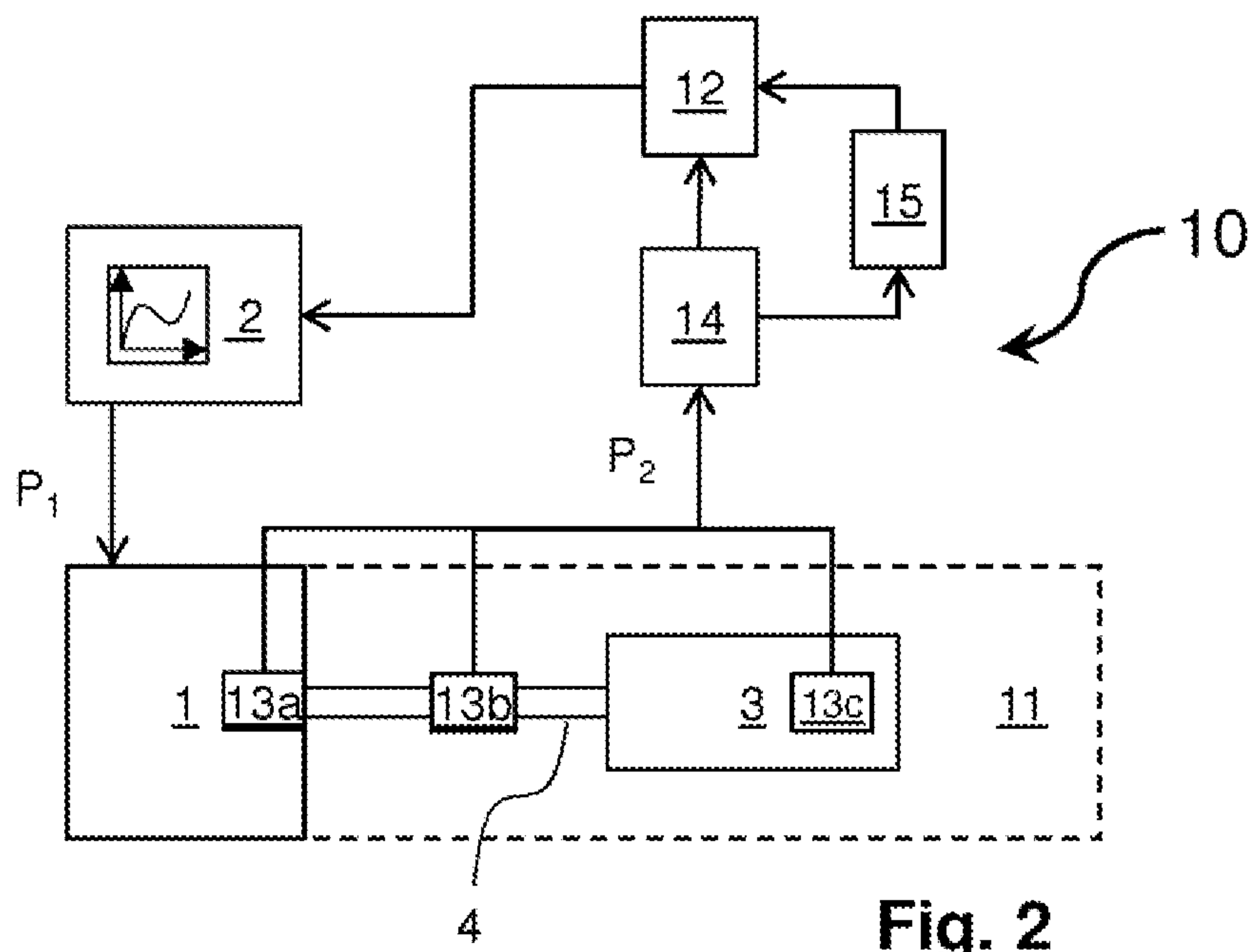
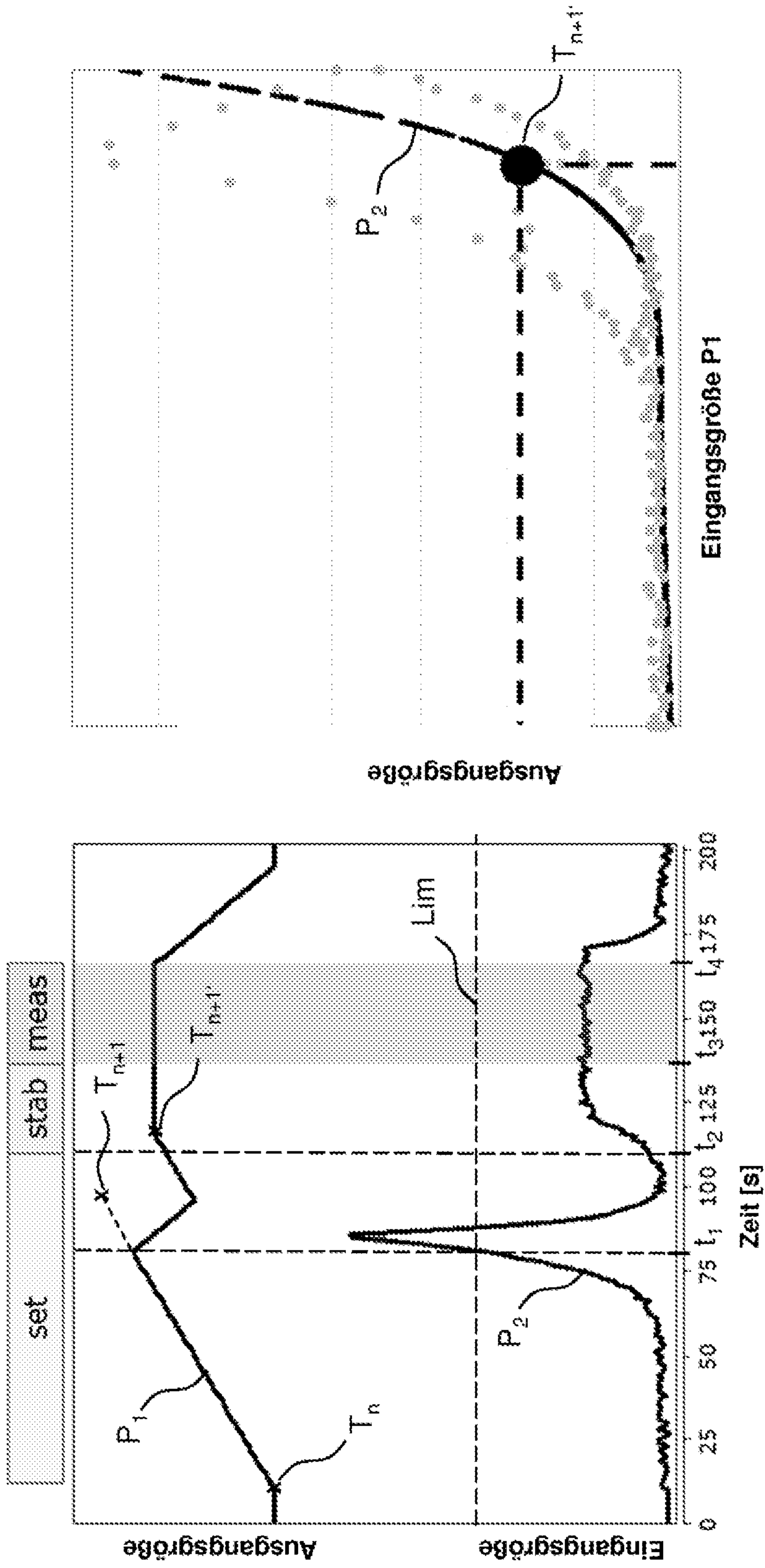


Fig. 2



(a) Stand der Technik (b) Fig. 3

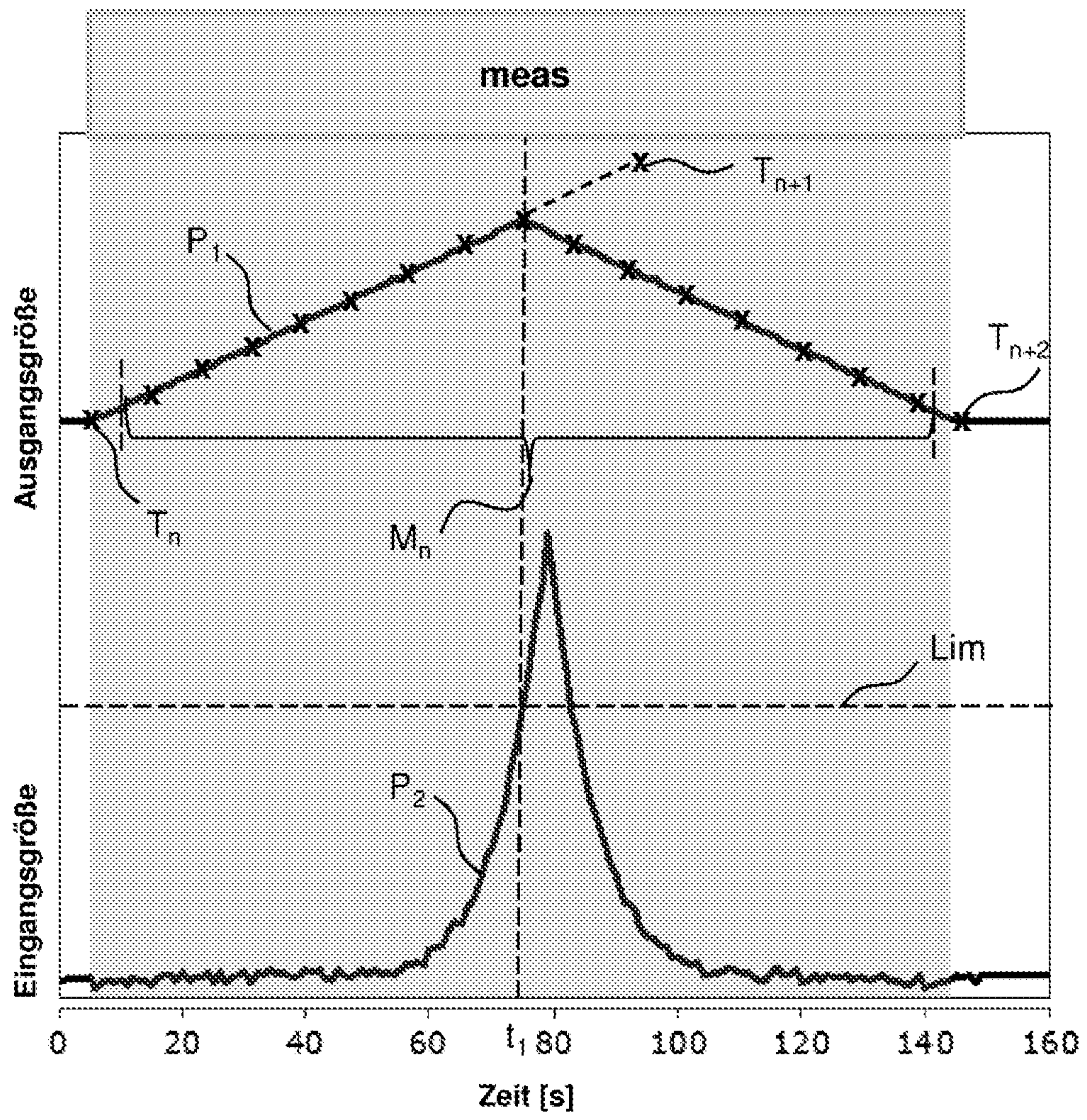


Fig. 4

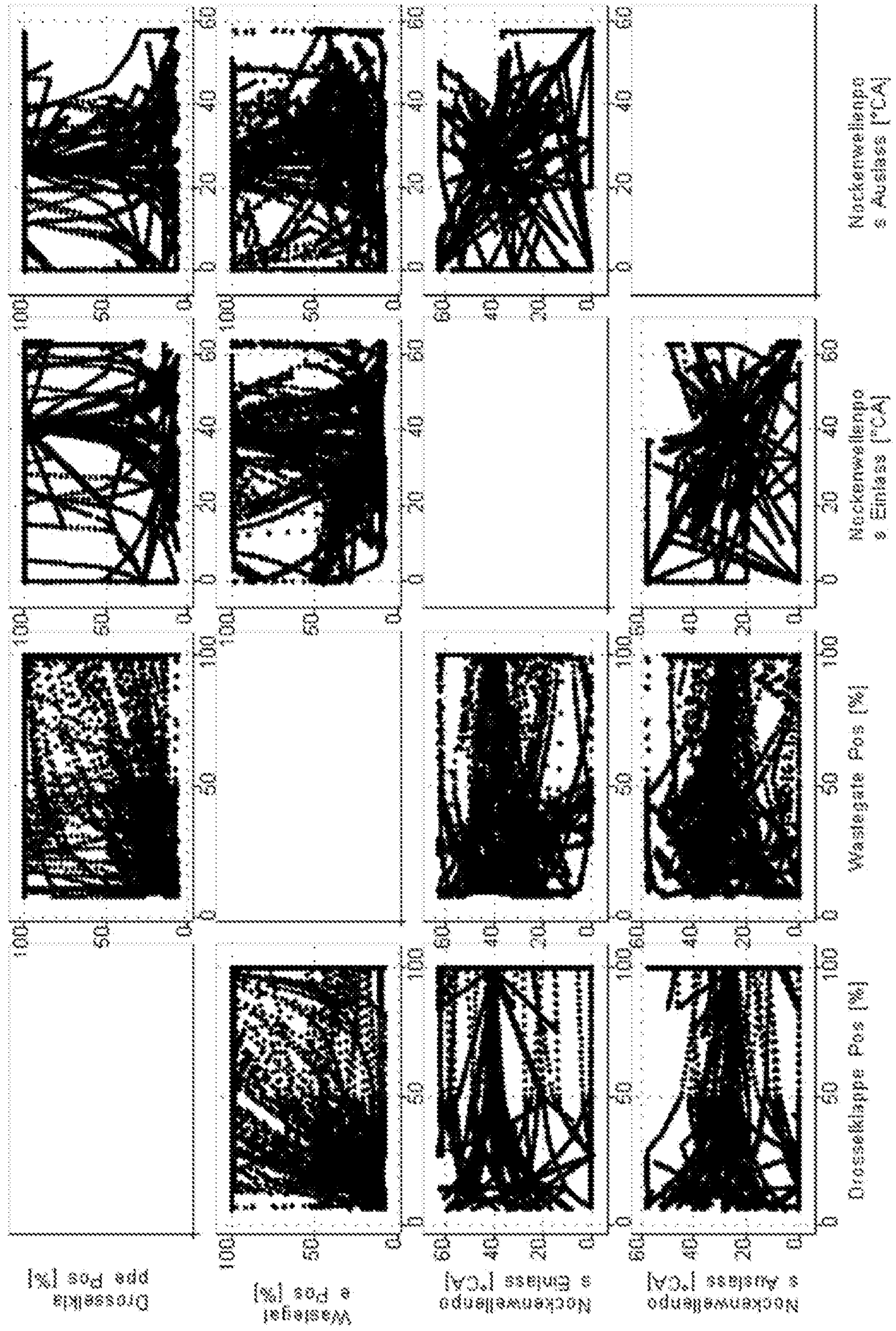


Fig. 5

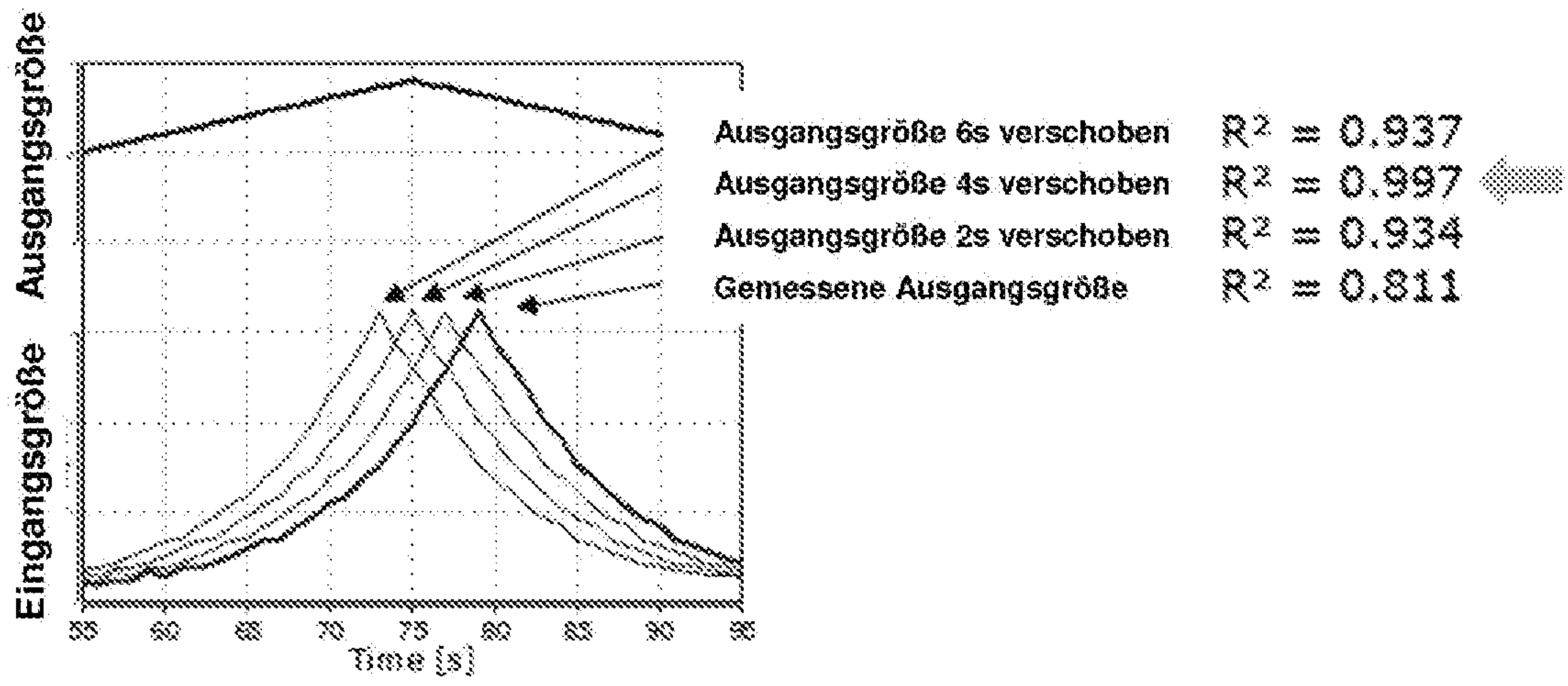


Fig. 6