

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50499/2018
(22) Anmeldetag: 21.06.2018
(43) Veröffentlicht am: 15.01.2020

(51) Int. Cl.: **F02D 41/24** (2006.01)
F02D 41/26 (2006.01)
F02D 41/14 (2006.01)
G05B 13/02 (2006.01)
G06F 17/11 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
AT 510328 A2
DE 102015207252 A1
CN 107856670 A
DE 102017122168 A1

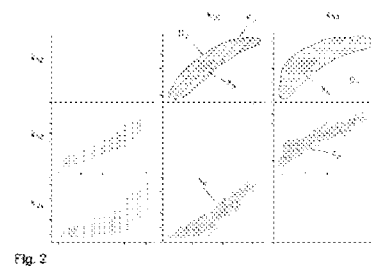
(71) Patentanmelder:
AVL List GmbH
8020 Graz (AT)

(72) Erfinder:
Rainer Andreas Dipl.Ing. (FH)
9422 Maria Rojach (AT)
Didcock Nico Dipl.Ing.
8020 Graz (AT)

(74) Vertreter:
Patentanwälte Pinter & Weiss OG
1040 Wien (AT)

(54) **Verfahren zur Kalibrierung eines technischen Systems**

(57) Um bei der Kalibrierung eines technischen Systems auf einfache und rasche Weise die Einhaltung einer Datenhülle prüfen zu können ist vorgesehen, dass der d -dimensionale Kalibrationsraum, der die für die Kalibrierung benötigten Kalibrationsvariablen umfasst, auf einen ersten Unter-Kalibrationsraum mit einer Dimension $d_{\text{sub}} < d$ und zumindest einen weiteren Unter-Kalibrationsraum aufgeteilt wird und mit vorhandenen Datenpunkten zumindest für den ersten Unter-Kalibrationsraum eine d_{sub} -dimensionale Datenhülle berechnet wird, die bei der Kalibrierung als Nebenbedingung geprüft wird.



Zusammenfassung

Um bei der Kalibrierung eines technischen Systems auf einfache und rasche Weise die Einhaltung einer Datenhülle prüfen zu können ist vorgesehen, dass der d -dimensionale Kalibrationsraum, der die für die Kalibrierung benötigten Kalibrationsvariablen umfasst, auf einen ersten Unter-Kalibrationsraum mit einer Dimension $d_{\text{sub}} < d$ und zumindest einen weiteren Unter-Kalibrationsraum aufgeteilt wird und mit vorhandenen Datenpunkten zumindest für den ersten Unter-Kalibrationsraum eine d_{sub} -dimensionale Datenhülle berechnet wird, die bei der Kalibrierung als Nebenbedingung geprüft wird.

Fig. 2

Verfahren zur Kalibrierung eines technischen Systems

Die gegenständliche Erfindung betrifft ein Verfahren zur Kalibrierung eines technischen Systems, das durch eine Anzahl von Steuervariablen des technischen Systems gesteuert wird und sich in Abhängigkeit der Steuervariablen des technischen Systems ein Betriebspunkt in Form einer Anzahl von Zustandsvariablen des technischen Systems einstellt, wobei bei der Kalibrierung in einem i -ten Betriebspunkt durch eine Optimierung unter Einhaltung vorgegebener Nebenbedingungen die Steuervariablen des technischen Systems gesucht werden, die hinsichtlich zumindest einer Ausgangsgröße des technischen Systems optimal sind, wobei mit einer Nebenbedingung der Optimierung geprüft wird, ob ein bei der Optimierung berechneter Testpunkt mit Steuervariablen des technischen Systems innerhalb einer Datenhülle um eine Anzahl vorhandener Datenpunkte des technischen Systems liegt.

Bei der Kalibrierung eines Verbrennungsmotors geht es im Allgemeinen darum, bestimmte vorgegebene Steuervariablen des Verbrennungsmotors in Abhängigkeit von Zustandsvariablen des Verbrennungsmotors so festzulegen, sodass bestimmte Vorgaben, wie z.B. Emissionsgrenzen oder Verbrauchsgrenzen (allgemein Ausgangsgrößen), eingehalten werden und dabei unzulässige Betriebszustände des Verbrennungsmotors vermieden werden. Steuervariablen sind dabei Variablen, über die der Verbrennungsmotor geregelt oder gesteuert wird, also beispielsweise ein Zündzeitpunkt, ein Einspritzzeitpunkt (z.B. Voreinspritzung, Nacheinspritzung), die Menge an rückgeführtem Abgas eines EGR (Exhaust Gas Recirculation), die Stellung einer Drosselklappe, etc. Zustandsvariablen sind Größen des Verbrennungsmotors, die sich in Abhängigkeit der Steuervariablen und in Abhängigkeit von aktuellen äußeren Einflüssen (wie z.B. eine Last, Umgebungsbedingungen (z.B. Umgebungstemperatur, Atmosphärendruck), usw.) einstellen. Typische Zustandsvariablen eines Verbrennungsmotors sind die Drehzahl und das Drehmoment. Die Zustandsvariablen bilden einen Betriebszustand des Verbrennungsmotors ab. Die Zustandsvariablen können gemessen werden, können aber auch, z.B. anhand von Modellen, aus anderen Messgrößen des Verbrennungsmotors berechnet werden. Die Steuervariablen und die Zustandsvariablen bilden gemeinsam die Eingangsgrößen der Kalibrierung, in Form eines Eingangsgrößenvektors aller Steuervariablen und Zustandsvariablen. Unzulässige Betriebszustände werden beispielsweise anhand physikalisch messbarer Ausgangsgrößen, wie z.B. ein Verbrauch, eine Emission (NO_x, CO_x, Ruß, etc.), ein Zylinderdruck, eine Motortemperatur, usw. festgestellt. Dazu werden in der Regel entsprechende Grenzwerte der messbaren Ausgangsgrößen vorgegeben. Die Ausgangsgrößen stellen sich in Abhängigkeit vom aktuellen Betriebszustand (Zustandsvariablen) und den aktuellen Steuervariablen als Reaktion des Verbrennungsmotors ein. Bestimmte Zustandsvariablen können auch begrenzt werden, beispielsweise ein maximales Drehmoment oder eine maximale Drehzahl, und damit einen unzulässigen Betriebszustand

definieren. Ein unzulässiger Betriebszustand des Verbrennungsmotors kann sich aber auch an unerwünschten Effekten wie Klopfen, Fehlzündungen, usw. manifestieren. Solche unzulässige Betriebszustände treten dabei bei bestimmten Kombinationen von Eingangsgrößen auf, möglicherweise auch in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen. Bei der Kalibrierung eines Verbrennungsmotors gilt es nun, die Steuervariablen für gegebene Zustandsvariablen, und eventuell auch für bestimmte äußere Einflüsse, so festzulegen, dass möglichst keine unzulässigen Betriebszustände auftreten und gleichzeitig gewisse Ausgangsgrößen (Ziele der Kalibrierung) optimiert (in der Regel minimiert) werden, typischerweise Emissionswerte (NO_x, CO_x, HC (Kohlenwasserstoff) Anteil im Abgas, Ruß, Feinstaub, etc.) und Verbrauch.

Als Versuchsraum wird bei der Kalibrierung der mehrdimensionale (gemäß der Anzahl der Steuervariablen) Raum bezeichnet, der durch die Steuervariablen aufgespannt wird. Alle zulässigen Steuervariablen des Versuchsraums bilden den fahrbaren Bereich, innerhalb der die Steuervariablen für gegebene Zustandsvariablen liegen müssen, um keine unzulässigen Betriebszustände hervorzurufen. Der fahrbare Bereich, der von den aktuellen Zustandsvariablen abhängig ist, ist damit ein Unterraum des Versuchsraumes. Der äußere Rand des fahrbaren Bereichs wird häufig auch als Fahrbarkeitsgrenze bezeichnet.

Die Steuervariablen sind dabei häufig in Steuergeräten hinterlegt, beispielsweise als Kennfelder in Abhängigkeit von den Zustandsvariablen. Für einen Verbrennungsmotor sind die Steuervariablen z.B. in einem Motorsteuergerät, für ein Getriebe z.B. in einem Getriebesteuergerät, für einen Hybridantriebsstrang z.B. in einem Hybridsteuergerät, usw. hinterlegt.

Heutige Verbrennungsmotoren haben eine Vielzahl von Steuervariablen, die in Abhängigkeit einer Vielzahl von Zustandsvariablen eingestellt werden. Aufgrund der sich damit ergebenden Vielzahl der Eingangsgrößen der Kalibrierung, der üblicherweise nichtlinearen Einflüsse der Steuervariablen auf die Betriebszustände des Verbrennungsmotors und auch aufgrund der, auch mehrfachen, Abhängigkeiten der Eingangsgrößen (weil die Fahrbarkeitsgrenze eingehalten werden muss) untereinander ist die Kalibrierung eine sehr komplexe Aufgabenstellung, die manuell kaum zu bewerkstelligen ist. Die Kalibrierung wird daher häufig als Optimierungsproblem gelöst, wobei die oder gewisse Eingangsgrößen hinsichtlich einer oder mehrere Ausgangsgrößen optimiert (minimiert oder maximiert) werden. Bei der Optimierung werden für vorgegebene Zustandsvariablen, und gegebenenfalls auch für gegebene äußere Einflüsse, die Steuervariablen variiert, um die Ausgangsgrößen zu optimieren. Als Ausgangsgröße werden bei der Kalibrierung eines Verbrennungsmotors häufig Emissionswerte oder der Verbrauch herangezogen. Dabei werden bei der Optimierung auch Nebenbedingungen vorgegeben, insbesondere auch die Einhaltung der Fahrbarkeitsgrenze. D.h., dass bei der Optimierung die Steuervariablen und die Zustandsvariablen nur innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze liegen dürfen. Auf diese Weise werden in der Regel Kennfelder für die Steu-

ervariablen in Abhängigkeit von den Zustandsvariablen, und gegebenenfalls auch in Abhängigkeit von äußere Einflüssen, erstellt, die im Motorsteuergerät des Verbrennungsmotors zum Steuern des Verbrennungsmotors hinterlegt werden. Im Fahrbetrieb werden die aktuellen Zustandsvariablen erfasst und aus den hinterlegten Kennfeldern die vorzunehmenden Einstellungen für die Steuervariablen entnommen und am Verbrennungsmotor eingestellt.

Ein Problem dabei ist, dass man zur Kalibrierung nur eine begrenzte, diskrete Anzahl von Datenpunkten der Eingangsgrößen (ein Datenpunkt ist hierbei ein konkreter Eingangsgrößenvektor) zur Verfügung hat. Diese Datenpunkte werden dabei entweder aus Modellen berechnet oder auf einem Prüfstand am real vorhandenen und betriebenen Verbrennungsmotor gemessen. Eine Fahrbarkeitsgrenze liegt damit aber noch nicht vor. Ob nun eine aus der Optimierung für bestimmte Zustandsvariablen neu bestimmte Steuervariable, in den meisten Fällen ein Steuervariablenvektor mit mehreren Steuervariablen, innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze liegt, oder außerhalb, kann daher anhand der vorhandenen diskreten Datenpunkte nicht ermittelt werden. Daher wurden schon sogenannten Datenhüllen verwendet, die aus einer begrenzten Anzahl von Datenpunkten eine Einhüllende der Datenpunkte, die sogenannte Datenhülle, berechnet. Die Fahrbarkeitsgrenze wird damit von der Datenhülle gebildet.

Um dieses Problem zu lösen sind schon Hüllenalgorithmen bekannt geworden, die die Datenhüllen ausschließlich aus den vorhandenen zulässigen Datenpunkten berechnen. Ein Beispiel hierfür ist die konvexe Datenhülle, die als der kleinste, konvexe Raum definiert ist, welcher die vorhandenen Datenpunkte enthält. Ein bekannter Algorithmus, der eine konvexe Datenhülle annähert ist der sogenannte QuickHull Algorithmus. Die Verwendung der konvexen Datenhülle ist aber aus zweierlei Gründen problematisch. Erstens, ist die Berechnung der konvexen Hülle nur in niedrigdimensionalen Versuchsräumen effizient. Der Berechnungsaufwand steigt jedoch exponentiell mit der Dimension des Versuchsräume, aber auch mit der Anzahl der Datenpunkte für die Berechnung der Datenhülle, an, sodass eine Berechnung ab ca. 10-dimensionalen Versuchsräumen mit vertretbarem Rechenaufwand bereits praktisch unmöglich ist. Zweitens sind die relevanten Bereiche des Versuchsräume in der Praxis oft nicht konvex, was zu unrealistischen Datenhüllen führt. Dieses Problem wird oftmals durch etwas komplexere Triangulationen gelöst. Unter einer Triangulation versteht man die Aufteilung der konvexen Datenhülle in einfache Formen, also im zweidimensionalen Fall etwa die Triangulation der Datenpunkte in Dreiecksnetze. Ein Beispiel für nicht-konvexe Triangulationen sind die sogenannten Alpha-Shapes, wie beispielsweise in H. Edelsbrunner, et al., „Three-Dimensional Alpha Shapes“, ACM Transactions on Graphics, Vol.13, No. 1, Jan. 1994, Seiten 43-72 beschrieben. Die Berechnung dieser Triangulationen ist aber für höhere

Dimensionen, und auch für eine hohe Anzahl von Datenpunkten, ebenfalls sehr komplex und aufwendig.

Speziell bei der Kalibrierung eines Verbrennungsmotors sind in der Regel aber 10 bis 20 und mehr Steuervariablen (Dimension des Versuchsraumes >10) zu verarbeiten. Gleichfalls sind 5 10^5 bis 10^6 verfügbare Datenpunkte für die Kalibrierung keine Seltenheit. Beides macht die Berechnung einer konvexen Datenhülle bei der Kalibrierung praktisch unmöglich, zumindest mit vertretbarem Aufwand und in vertretbarer Zeit.

Aus der WO 2017/198638 A1 sind Hüllenalgorithmen bekannt, mit denen auch bei großen Dimensionen des Versuchsraumes, insbesondere auch >10 , mit vertretbarem Aufwand Datenhüllen berechnet werden können. Diese Algorithmen sind aber oftmals in verwendeten 10 Umgebungen zur Kalibrierung nicht implementiert und daher nicht verwendbar. Abgesehen davon ist es oftmals so, dass Kalibrieringenieure auf vertraute Algorithmen, insbesondere die konvexe Datenhülle, vertrauen, anstatt Neues zu versuchen.

Daher wird trotz der vorhandenen Alternativen oftmals der Versuchsraum manuell verkleinert, um konvexe Datenhüllen zu berechnen beispielsweise indem Datenhüllen über weniger 15 Dimensionen, aber dafür mehrere solcher Datenhüllen, berechnet werden. Die manuelle Auswahl der Steuervariablen für den Versuchsraum bedarf aber einiges an Erfahrung, weil die Auswahl der Steuervariablen Einfluss auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kalibrierung hat.

Die obigen Probleme treten aber nicht nur bei der Kalibrierung eines Verbrennungsmotors als technisches System auf, sondern können natürlich auf ein beliebiges technisches System übertragen werden, wobei das technische System aufgrund einer Vorgabe von Steuervariablen gesteuert wird und in Abhängigkeit von der Vorgabe der Steuervariablen einen bestimmten durch Zustandsvariablen definierten Zustand einnimmt. Ein anderes Beispiel ist eine 20 Getriebeanwendung mit einer Getriebebesteuereinheit (TCU) oder eine Hybridanwendung mit Hybridsteuereinheit und/oder Batteriemanagementsystem. Weitere Beispiel sind eine Klimatisierung eines Fahrzeugs oder eine elektronisch steuerbare Federung oder Aufhängung. Im Prinzip kann jegliches mechatronisches System als technisches System, das von einer Steuereinheit gesteuert wird, kalibriert werden. Bei der Kalibrierung des technischen Systems ist es das allgemeine Ziel, die Steuervariablen in Abhängigkeit von den Zustandsvariablen so vorzugeben, dass möglichst keine unzulässigen Betriebszustände auftreten und gleichzeitig vorgegebene Ausgangsgrößen des technischen Systems hinsichtlich eines Optimierungsziels optimiert werden. Bei der Kalibrierung werden in der Regel Datenfelder oder 30 Datentabellen erzeugt, anhand derer das technische System gesteuert werden kann. Diese Datenfelder oder Datentabellen werden dabei in der Regel in einem Steuergerät des techni- 35

5 schen Systems gespeichert, um im Betrieb die für den jeweiligen Betriebszustand optimalen Steuervariablen auslesen zu können. Typische Beispiele von Komponenten eines Fahrzeugs, die mit zugehörigen Steuergeräten gesteuert werden, sind neben dem Verbrennungsmotor ein Getriebe, eine Antriebsbatterie, Bremsen, ein Antriebsstrang, eine Radaufhängung, etc.

10 Die erfindungsgemäße Kalibrierung kann aber auch zur Optimierung des Verhaltens eines Fahrzeugs oder einer Komponente eines Fahrzeugs verwendet werden. Oftmals werden durch Kalibrierung die Fahreigenschaften eines Fahrzeugs (z.B. Geräusch, Fahrwerk, Dämpfung, Schaltverhalten, Lenkung, Klimatisierung, etc.) hinsichtlich gewünschter Eigenschaften optimiert. Als Beispiele seien eine Dämpfungsoptimierung, Getriebeoptimierung, Kupp-
15 lungsoptimierung oder die Abstimmung einer Fahrzeuglenkung genannt. Die Steuervariablen sind damit bestimmte Einstellungen am technischen System, mit denen das technische System betrieben wird. Beispielsweise kann die Steifigkeit eines Fahrwerks optimiert werden, indem die Federparameter (Steuervariablen) in Fahrwerklagern variiert werden, um bestimmte Ausgangsgrößen, wie z.B. die Fahrdynamik oder den Fahrkomfort, zu beeinflussen bzw.
20 zu optimieren. Ein anderes Beispiel ist eine hydrodynamische Kupplung, wobei der Kupplungsfüllverlauf optimiert wird, oder die Abstimmung des Verhaltens oder der Eigenschaften einer Fahrzeuglenkung.

20 Die Kalibrierung ist aber auch nicht auf Komponenten eines Fahrzeugs beschränkt, sondern kann ganz allgemein für beliebige Maschinenkomponenten als technisches System angewendet werden.

25 Als technisches System für die Kalibrierung kommt daher insbesondere jede Komponente einer Maschine, z.B. eines Fahrzeugs, in Frage, das im Betrieb durch Steuervariablen beeinflusst werden kann (z.B. durch Steuerung oder durch eine bestimmte Einstellung) und das hinsichtlich eines bestimmten Verhaltens in Abhängigkeit von einem Betriebszustand optimiert werden soll.

Es ist daher ein Ziel der gegenständlichen Erfindung ein Verfahren zur Kalibrierung eines technischen Systems anzugeben, das es ermöglicht auf Basis gültiger Datenpunkte auf einfache und rasche Weise die Einhaltung einer Datenhülle zu berücksichtigen.

30 Diese Aufgabe wird mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 1 gelöst. Durch die Aufteilung des Kalibrierraumes auf mehrere kleinere Unter-Kalibrierräume, für die dann Datenhüllen berechnet werden, kann der Rechenaufwand für die Ermittlung der Datenhüllen deutlich gesenkt werden. Anstelle eine Datenhülle hoher Dimension werden somit Datenhüllen kleinerer Dimension verwendet, die schneller ermittelt werden können. Das erfindungs-

gemäße Vorgehen bei der Aufteilung stellt dabei sicher, dass die Kalibrationsvariablen, die den größten beschränkenden Einfluss haben in einem ersten Unter-Kalibrierraum enthalten sind. Das Ziel ist, den kleinsten (z.B. konvexen) Raum, der die Daten einhüllt als Datenhülle zu definieren. Die Kalibrationsvariablen, die den größten beschränkenden Einfluss haben, führen auch zur kleinsten Datenhülle, weshalb diese in vorteilhafter Weise im ersten Unter-Kalibrationsraum aufgenommen werden. Das ermöglicht es auch, die Kalibrierung bei Kalibrierräumen hoher Dimension (>10) und mit herkömmlichen Hüllenalgorithmen, insbesondere einen konvexen Hüllenalgorithmus wie den QuickHull Algorithmus, durchzuführen.

Der Aufwand für die Ermittlung der weiteren Unter-Kalibrationsräume, kann reduziert werden, wenn einfach zumindest ein verbleibender e-dimensionaler Zusammenhang mit nicht für den ersten Unter-Kalibrationsraum ausgewählten Kalibrationsvariablen als weiterer Unter-Kalibrationsraum verwendet wird und die e-dimensionale Datenhülle dieses e-dimensionalen Zusammenhanges bei der Kalibrierung als Nebenbedingung geprüft wird. Der Aufwand reduziert sich noch ganz erheblich, wenn alle verbleibenden e-dimensionale Zusammenhänge mit nicht für den ersten Unter-Kalibrationsraum ausgewählten Kalibrationsvariablen als weitere Unter-Kalibrationsräume verwendet werden.

Die Kalibrierung kann einfach auf äußere Einflüsse auf das technische System erweitert werden, wenn bei der Kalibrierung zumindest ein äußerer Einfluss auf das technische System berücksichtigt wird und die Kalibrationsvariablen den zumindest einen äußeren Einfluss umfassen.

Die gegenständliche Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Figuren 1 bis 3 näher erläutert, die beispielhaft, schematisch und nicht einschränkend vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung zeigen. Dabei zeigt

Fig.1 die kombinatorischen Variationen der Kalibrationsvariablen des Kalibrierraumes in Form zweidimensionaler Diagramme der Kalibrationsvariablen, Fig.2 und 3 jeweils einen Auszug davon mit zweidimensionalen Datenhüllen und Fig.4 ein Beispiel einer Kalibrierung eines technischen Systems.

Einleitend sei erwähnt, dass es hinlänglich bekannte Methoden gibt, um einen Versuchsplan (auch als Design of Experiments (DoE) bekannt) in Form einer Anzahl von Steuervariablen zu erstellen, mit dem das technische System ideal angeregt werden kann, um die statischen und dynamischen Eigenschaften des technischen Systems optimal zu erfassen. Wird das technische System mit den Steuervariablen angeregt und dabei die Zustandsvariablen gemessen erhält man Datenpunkte \mathbf{x}_n , also in diesem Fall konkrete Messungen am technischen System. Ebenso gibt es hinlänglich bekannte Methoden, um ein Modell eines techni-

schen Systems, bzw. einer Ausgangsgröße y des technischen Systems, anhand von verfügbaren Datenpunkten \mathbf{x}_n zu identifizieren. Es können für technische Systeme auch bekannte, vorhandene Modelle genutzt werden. Mit dem Modell muss die Ausgangsgröße y nicht mehr gemessen werden, sondern kann auch für andere Datenpunkte aus dem Modell berechnet werden. Ebenso können mit einem Modell die Zustandsvariablen in Abhängigkeit von den Steuervariablen modelliert werden, womit es auch möglich ist, aus einem solchen Modell weitere Datenpunkte \mathbf{x}_n zu ermitteln. Oftmals werden der Versuchsplan und ein Modell auch gleichzeitig ermittelt. Beispiele hierfür finden sich in WO 2012/169972 A1 oder WO 2014/187828 A1. Für die gegenständliche Erfindung kommt es aber nicht auf die konkrete Art an wie man zu den Datenpunkten \mathbf{x}_n kommt, sondern es wird davon ausgegangen, dass eine Vielzahl gültiger Datenpunkte \mathbf{x}_n (also innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze) vorliegen. Ebenso ist es für die Erfindung unerheblich, wie die Ausgangsgröße y ermittelt wird, beispielsweise messtechnisch am technischen System, oder aus einem geeigneten Modell.

Die Erfindung wird nun ohne Einschränkung der Allgemeinheit am Beispiel eines Verbrennungsmotors als technisches System beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass eine Vielzahl $n = 1, \dots, N$ von gültigen (also innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze liegenden) Datenpunkten \mathbf{x}_n des technischen Systems vorhanden ist. Die Datenpunkte \mathbf{x}_n können durch Messung auf einem Prüfstand für das technische System, beispielsweise auf einem Motorprüfstand für einen Verbrennungsmotor, oder anhand eines vorhandenen oder identifizierten Modells des technischen Systems ermittelt werden. In beiden Fällen ist es für die Kalibrierung üblicherweise das Ziel, mit den Datenpunkten \mathbf{x}_n den Versuchsraum, also den Raum der Steuervariablen \mathbf{u}_n , in Abhängigkeit von den Zustandsvariablen \mathbf{v}_n , innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze möglichst gut und gleichmäßig abzudecken.

Ein Datenpunkt \mathbf{x}_n ist dabei jeweils ein Vektor mit allen an der Kalibrierung beteiligten Kalibrationsvariablen k_v in Form konkreter Werte aller beteiligten k Steuervariablen $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_k]$ und konkreter Werte aller beteiligten m Zustandsvariablen $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_m]$, also

$\mathbf{x}_n = [\mathbf{u}_n^T, \mathbf{v}_n^T]^T$. In den Kalibrationsvariablen k_v könnten auch äußere Einflüsse w berücksichtigt werden, die in der Regel nicht verändert werden können, sondern vorliegen und sich üblicherweise nur sehr langsam ändern. Auf einem Prüfstand für das technische System könnten aber auch solche äußeren Einflüsse w eingestellt werden. Ein Datenpunkt \mathbf{x}_n könnte damit auch solche äußere Einflüsse w beinhalten, was aber am erfindungsgemäßen Vorgehen nichts ändert. Die Steuervariablen \mathbf{u}_n und Zustandsvariablen \mathbf{v}_n sind dazu gegebenenfalls ebenfalls in entsprechenden Vektoren zusammengefasst.

Die Kalibrierung ist dann ein Optimierungsproblem, das beispielsweise allgemein in der Form

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(\mathbf{v}) &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{y}(\mathbf{x}) \quad \forall \mathbf{v} \in Z \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) &\leq 0 \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq 0 \end{aligned}$$

angeschrieben werden kann. Dabei bezeichnet Z den Zustandsraum gegeben durch die Zustandsvariablen \mathbf{v} . \mathbf{h} und \mathbf{g} sind vorgegebene Nebenbedingungen der Optimierung. Optimiert werden Ausgangsgrößen \mathbf{y} des technischen Systems, die in einem Ausgangsgrößenvektor \mathbf{y} zusammengefasst sind, beispielsweise Emissionswerte, der Verbrauch, usw. eines Verbrennungsmotors. Es wird nach zumindest einer Ausgangsgröße y optimiert, indem der Steuervariablenvektor \mathbf{u} in Abhängigkeit von einem gegebenen Zustandsvariablenvektor \mathbf{v} variiert wird. Mit der Nebenbedingung \mathbf{h} kann z.B. die Einhaltung zulässiger Betriebszustände des technischen Systems, wie beispielsweise Emissions- oder Verbrauchsgrenzen, ein maximaler Zylinderdruck, eine maximale Motortemperatur, Vermeidung von Klopfen, usw., vorgegeben werden und mit der Nebenbedingung \mathbf{g} kann eine Datenhülle D , also z.B. das Einhalten einer Fahrbarkeitsgrenze, vorgegeben werden. Die Ausgangsgröße \mathbf{y} kann am technischen System 1 gemessen werden oder kann aus einem Modell des technischen Systems 1 ermittelt werden.

Die Kalibrierung wird in der Regel jeweils in einem vorgegebenen, festgehaltenen i -ten, $i = 1, \dots, l$ Betriebspunkt des technischen Systems, der durch einen vorgegebenen i -ten Zustandsvariablenvektor \mathbf{v}_i , der alle Zustandsvariablen \mathbf{v} enthält, gegeben ist, durchgeführt. Die Kalibrierung kann dabei gegebenenfalls auch bei bestimmten äußeren Einflüssen \mathbf{w} durchgeführt werden. Die Kalibrierung an festen Betriebspunkten erleichtert die Kalibrierung, da damit die Kalibrationsvariablen \mathbf{k}_v auf die Steuervariablen \mathbf{u} , und gegebenenfalls auf bestimmte äußere Einflüsse \mathbf{w} , reduzieren werden können, also z.B. $\mathbf{x}_i = [\mathbf{u}]^T$. In gleicher Weise vereinfachen sich damit aber auch die Nebenbedingungen zu $\mathbf{h}_i(\mathbf{u}_i)$ und $\mathbf{g}_i(\mathbf{u}_i)$. In diesem Fall spricht man auch von lokaler Kalibrierung, da nur die für den jeweiligen i -ten Betriebspunkt geltenden Steuervariablen \mathbf{u}_i berücksichtigt werden, nicht jedoch die Zustandsvariablen \mathbf{v}_i . Damit wird auch nur eine lokale Datenhülle berücksichtigt. Die lokale Datenhülle umfasst damit nur gültige Datenpunkte \mathbf{x}_{ni} für den festgehaltenen i -ten Betriebspunkt. Das obige Optimierungsproblem für den i -ten Betriebspunkt vereinfacht sich dann zu

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{y}(\mathbf{u}) \\ \mathbf{h}_i(\mathbf{u}_i) &\leq 0 \\ \mathbf{g}_i(\mathbf{u}_i) &\leq 0 \end{aligned}$$

Dieses Optimierungsproblem wird für zumindest einen, vorzugsweise für jeden, der i Betriebspunkte gelöst. Die bekannten Datenpunkte \mathbf{x}_n werden bei der Kalibrierung nur für die Prüfung der Datenhülle in Form der Nebenbedingung $g_i(\mathbf{u}_i)$ benötigt. Der Nachteil der lokalen Kalibrierung ist, dass dadurch an sich bekannte Information benachbarter Betriebspunkte systematisch ignoriert wird.

Daher werden in der Kalibrierung die Zustandsvariablen \mathbf{v}_i oftmals als zusätzlicher Eingang berücksichtigt, womit die Kalibrationsvariablen \mathbf{v}_i sowohl die Steuervariablen \mathbf{u} als auch die Zustandsvariablen \mathbf{v} umfassen, und gegebenenfalls auch bestimmte äußere Einflüsse, also z.B. $\mathbf{x}_i = [\mathbf{u}, \mathbf{v}]^T$. Die Kalibrierung kann dabei gegebenenfalls auch bei bestimmten äußeren Einflüssen durchgeführt werden. Bei der Kalibrierung wird wiederum der Steuervariablenvektor \mathbf{u} in Abhängigkeit von einem gegebenen Zustandsvariablenvektor \mathbf{v}_i variiert. In gleicher Weise ergeben sich die Nebenbedingungen im i -ten Betriebspunkt \mathbf{v}_i zu $\mathbf{h}(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i)$ und $g(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i)$. In diesem Fall spricht man auch von globaler Kalibrierung und es wird mit der Nebenbedingung $g(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i)$ eine globale Datenhülle über alle Datenpunkte \mathbf{x}_n berücksichtigt. Das Optimierungsproblem folgt dann für jeden der i Betriebspunkte \mathbf{v}_i in der Form

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i(\mathbf{v}_i) &= \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{y}(\mathbf{u}, \mathbf{v}_i) \\ \mathbf{h}(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) &\leq 0 \\ g(\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i) &\leq 0 \end{aligned}$$

Dieses Optimierungsproblem wird für zumindest einen, vorzugsweise für alle, i Betriebspunkte gelöst. Die Kalibrierung erfolgt damit ebenfalls bei einem bestimmten i -ten Betriebspunkt \mathbf{v}_i , nur wird nun über die Randbedingungen \mathbf{h} bzw. g auch Information aus weiteren, insbesondere benachbarten, Betriebspunkten berücksichtigt. Dadurch werden die durch die Optimierung identifizierten Modelle der Ausgangsgrößen \mathbf{y} genauer und die durch die globale Datenhülle vorgegebene Randbedingung g weniger restriktiv.

Die Ausgangsgrößen \mathbf{y} , für jeden der i Betriebspunkte, des technischen Systems sind jeweils ein Optimierungsziel bzw. ein Ziel der Kalibrierung, beispielsweise die Minimierung der Emissionen, wie z.B. einer NO_x, CO_x, HC oder Ruß Emission eines Verbrennungsmotors, die Minimierung des Verbrauchs eines Verbrennungsmotors, usw. Der Zusammenhang zwischen Ausgangsgrößen \mathbf{y} und der Steuervariablen \mathbf{u} und gegebenenfalls der Zustandsvariablen \mathbf{v} wird durch die Kalibrierung identifiziert. Es gibt hinlänglich bekannte Verfahren zur Lösung der oben erwähnten Optimierungsprobleme, beispielsweise werden in der WO 2013/087307 A2 solche Verfahren beschrieben. Bei der Optimierung werden also die Steuervariablen \mathbf{u} gesucht, die hinsichtlich zumindest einer Ausgangsgröße \mathbf{y} des technischen Systems optimal sind, wobei die Optimierung in der Regel auf eine Minimierung oder Maxi-

mierung der Ausgangsgröße abzielt. Allgemein wird die Optimierung iterativ durchgeführt, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht ist. Ein mögliches Abbruchkriterium ist z.B. eine bestimmte Anzahl von Iterationen oder das Erreichen bzw. Unterschreiten einer Zielvorgabe der Ausgangsgrößen y . Die Steuervariablen u zum Zeitpunkt des Eintretens des Abbruchkriteriums werden als optimale Steuervariablen u angesehen. Das technische System wird dann mit diesen optimalen Steuervariablen betrieben. Dabei wird in jedem Iterationsschritt auch die Einhaltung der Nebenbedingungen überprüft. Für die gegenständliche Erfindung kommt es aber nicht darauf an wie man das Optimierungsproblem konkret löst.

Bei der Kalibrierung wird durch die Optimierung in jedem Iterationsschritt j der Optimierung für jeden der i Betriebspunkte v_i ein neuer Steuervariablenvektor u_{ij} ermittelt, unter Berücksichtigung der Datenhülle in der Nebenbedingung g , die aus den N vorhandenen Datenpunkten x_n ermittelt wird. Wird das vorgegebene Abbruchkriterium erreicht und erfüllt der neue Steuervariablenvektor u_{ij} alle Nebenbedingungen, dann wird der Steuervariablenvektor u_{ij} im letzten Iterationsschritt zur optimierten Steuervariablen u_i im i -ten Betriebspunkt. Um bei der Kalibrierung die Einhaltung der Nebenbedingung g zu überprüfen, wird in jedem Iterationsschritt j geprüft, ob dieser neue Steuervariablenvektor u_{ij} innerhalb der Datenhülle, also z.B. innerhalb der Fahrbarkeitsgrenze, liegt, oder außerhalb. Diese Überprüfung muss auch für hohe Dimensionen (>10) des durch die Steuervariablen u und gegebenenfalls Zustandsvariablen v definierten Kalibrationsraums K ausreichend schnell möglich sein. Je nach Art der Kalibrierung (lokal oder global) umfasst der Kalibrationsraum K demnach den Versuchsraum (der Steuervariablen) oder den Versuchsraum (der Steuervariablen) und den Zustandsraum (der Zustandsvariablen), gegebenenfalls auch unter Berücksichtigung äußerer Einflüsse. Um die Nebenbedingung g bei der Optimierung prüfen zu können, ist aber zuerst aus den bekannten N Datenpunkten x_n die Datenhülle D zu ermitteln. Die Dimension d des Kalibrationsraumes K kann aber sehr groß werden, sodass die Berechnung der Datenhülle D mitunter sehr rechenaufwendig ist oder gar nicht berechnet werden kann (zumindest nicht in vertretbarer Zeit).

Die Kalibrierung könnte dabei wie in Fig.4 dargestellt ablaufen. Die Kalibrierung erfolgt in einer Kalibriereinheit 3 (die für die Kalibrierung verwendete Hardware und/oder Software) auf Basis von bekannten Datenpunkten x_n , indem die Steuervariablen u des technischen Systems 1 bei gegebenen Zustandsvariablen v , und gegebenenfalls gegebenen äußeren Einflüssen w , variiert werden, um die zumindest eine Ausgangsgröße y zu optimieren. Hierbei spielt es keine Rolle, ob das technische System 1 real als Hardware vorhanden ist oder durch ein Modell simuliert wird. Falls ein Modell für das technische System 1 verwendet wird, dann kann das Modell auch in der Kalibriereinheit 3 implementiert sein. Die Berechnung der Datenhülle D , wie nachfolgend ausgeführt, kann ebenfalls in der Kalibriereinheit 3 erfolgen.

Die in der Kalibrierung ermittelten Steuervariablen u , die die Ausgangsgröße optimieren, können dann in einer Steuereinheit 2, mit der das technische System 1 gesteuert wird, hinterlegt werden (wie in Fig.4 angedeutet) oder das technische System 1 damit eingestellt werden.

- 5 Erfindungsgemäß wird für die Berechnung der Datenhülle D der gesamte Kalibrationsraum K mit Dimension d zuerst aufgeteilt in einen ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} und eine Anzahl von weiteren Unter-Kalibrationsräumen $K_{\text{sub}2}$. Die Unter-Kalibrationsräume K_{sub} , $K_{\text{sub}2}$ sollen sich dabei vorzugsweise natürlich nicht überschneiden. Die Dimension d ist die Anzahl der Steuervariablen $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_k]$ und Zustandsvariablen $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_m]$, die in der Kalibrierung verwendet werden, also $d = k + m$. Falls auch äußere Einflüsse berücksichtigt werden, dann erhöht sich die Dimension d entsprechend. Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur mehr von Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d gesprochen, die die für die Kalibrierung verwendeten Steuervariablen und Zustandsvariablen, und gegebenenfalls äußere Einflüsse, umfassen. Erfindungsgemäß wird zuerst die maximale Dimension d_{sub} des ersten Unter-
- 15 Kalibrationsraumes K_{sub} festgelegt oder vorgegeben, mit $d_{\text{sub}} < d$. Die maximale Dimension d_{sub} ist dabei natürlich so gewählt, dass mit dem gewählten Hüllalgorithmus ausreichend schnell eine Datenhülle D_{sub} für diesen ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} berechnet werden kann. Bei Verwendung des QuickHull Algorithmus oder eines anderen Algorithmus zur Berechnung einer konvexen Datenhülle wird die maximale Dimension d_{sub} beispielsweise mit 4
- 20 bis 7 vorgegeben, wobei natürlich auch eine andere maximale Dimension d_{sub} gewählt werden kann. Bei anderen Algorithmen kann die maximale Dimension d_{sub} gegebenenfalls auch größer gewählt werden. Die weiteren Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ können dieselbe maximale Dimension $d_{\text{sub}2} = d_{\text{sub}}$ haben, können aber auch kleinere Dimension $d_{\text{sub}2}$ aufweisen, wobei die Dimensionen der einzelnen weiteren Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ (sofern mehrere vorhanden sind) nicht gleich sein müssen. Um die ursprüngliche Dimension d des Kalibrationsraumes K der Kalibrierung auf mehrere kleinere Unter-Kalibrationsräume K_{sub} , $K_{\text{sub}2}$ zu verteilen, müssen natürlich bestimmte Kalibrationsvariablen kv des Kalibrationsraumes K der Kalibrierung ausgewählt und den Unter-Kalibrationsräumen K_{sub} , $K_{\text{sub}2}$ zugeordnet werden.

- Dazu werden für die Anzahl d der Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d des Kalibrationsraumes K durch kombinatorische Variationen Teilmengen mit jeweils einer Anzahl e Elementen gebildet, also Teilmengen der Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d der Größe e . Je weniger Elemente e die Teilmengen haben, umso schneller lassen sich die Unter-Kalibrationsräume K_{sub} , $K_{\text{sub}2}$ ermitteln, weshalb kleine Mengen, insbesondere Mengen mit $e = 2$ Elementen, bevorzugt werden. Die Anzahl e der Elemente ist dabei natürlich kleiner als die Anzahl d der
- 35 Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d . Die kombinatorischen Variationen können dabei ohne Berücksichtigung der Reihenfolge der Elemente in den Teilmengen (also z.B. $\{a, b\} = \{b, a\}$)

oder mit Berücksichtigung der Reihenfolge der Elemente in den Teilmengen (also z.B. $\{a, b\} \neq \{b, a\}$) gebildet werden. Werden aus einer Menge mit d Elementen alle derartigen Variationen für eine Auswahl von e Elementen gebildet erhält man entweder $\binom{d}{e} = \frac{d!}{(d-e)!}$ Variatio-

nen mit Berücksichtigung der Reihenfolge oder $\binom{d}{e} = \frac{d!}{(d-e)!e!}$ Variationen ohne Berücksichtigung der Reihenfolge.

- 5 sichtigung der Reihenfolge. Für den gesamten Kalibrationsraum K mit der Dimension d ergeben sich daher eine Anzahl e -dimensionaler Zusammenhänge, in denen jeweils die Anzahl e der Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d enthalten sind. Die Anzahl der e -dimensionalen Zusammenhänge entspricht der Anzahl der möglichen kombinatorischen Variationen. Im Falle $e = 2$, oder $e = 3$, kann man diese Zusammenhänge auch in Form von zweidimensionalen, oder dreidimensionalen, Diagrammen B_V darstellen. In diesen zweidimensionalen, oder dreidimensionalen, Diagrammen B_V sind die bekannten Datenpunkte \mathbf{x}_n , die für die Ermittlung der Datenhüllen verwendet werden, aufgetragen.

- Im Ausführungsbeispiel nach Fig.1 wird von einem Kalibrationsraum K mit Dimension $d=9$ ausgegangen, d.h. dass der Kalibrationsraum K z.B. insgesamt neun Steuervariablen und Zustandsvariablen beinhaltet. Im Beispiel nach Fig.1 beispielsweise $m = 2$ Zustandsvariablen $v_1 (=kv_1), v_2 (=kv_2)$ des technischen Systems, hier z.B. eine Motordrehzahl und ein Motordrehmoment. Zusätzlich gibt es noch $k = 7$ Steuervariablen $u_1 (=kv_3), \dots, u_7 (=kv_d)$ des technischen Systems, wobei es nicht wichtig ist, welche Variablen das konkret sind. Daraus werden Teilmengen mit jeweils $e = 2$ Elementen gebildet, woraus sich $V = 72$ Variationen (bei Berücksichtigung der Reihenfolge) der Kalibrationsvariablen kv_1, \dots, kv_d und $V = 72$ zweidimensionale Diagramme als Zusammenhänge B_V ergeben. Diese Variationen sind in Fig.1 zur Veranschaulichung matrixförmig dargestellt. Würde man die Reihenfolge nicht berücksichtigen, dann würde man $V = 36$ Variationen erhalten, was entweder in Form der oberen oder unteren Dreiecksmatrix in Fig.1 dargestellt werden könnte.

- 25 Die Achsen der einzelnen zweidimensionalen Zusammenhänge B_V werden vorzugsweise normalisiert, d.h. dass die Abszissenwerte der einzelnen zweidimensionalen Zusammenhänge B_V auf gleichen Achsenlängen gebracht werden. Dasselbe passiert vorzugsweise mit den Ordinatenwerten, wobei die Achsenlängen der Abszissen und Ordinaten nicht gleich sein müssen. Der Schritt des Normalisierens ist nicht unbedingt erforderlich, aber vorteilhaft, weil das in der Regel zu besseren Ergebnissen führt. Es entstehen damit für die zweidimensionalen Zusammenhänge B_V rechteckige Raster mit gleichen Seitenlängen (den Achsenlängen der Abszissen und Ordinaten), wie in Fig.1 dargestellt. Dieser Schritt kann natürlich auch für höherdimensionale Zusammenhänge B_V durchgeführt werden.

Nun wird für jeden zweidimensionalen Zusammenhang B_V , oder allgemein für jeden e-dimensionalen Zusammenhang, eine Datenhülle D_V berechnet, beispielsweise eine konvexe Datenhülle D_V , beispielsweise mit dem QuickHull Algorithmus. Nachdem die Dimension der Zusammenhänge B_V vorzugsweise zwei ist, oder allgemein ausreichend klein gewählt wird, können solche Datenhüllen D_V sehr schnell berechnet werden. Die Datenhüllen D_V sind in Fig.2 für einige Diagramme dargestellt.

Als nächstes werden die Volumeninhalte F_V der berechneten Datenhüllen D_V ermittelt. Im Fall zweidimensionaler Datenhüllen D_V reduzieren sich die Volumen natürlich auf Flächeninhalte. Solchen Volumeninhalte F_V können mit den bekannten Datenhüllen D_V sehr einfach numerisch ermittelt werden. In Fig.2 und 3 sind zur Veranschaulichung jeweils einige zweidimensionale Diagramme B_V für bestimmte Kalibrationsvariablen k_V , sowie die zugehörigen Datenhüllen D_V und die Volumeninhalte F_V (hier Flächeninhalte) dargestellt. Je kleiner der Volumeninhalt F_V einer solchen e-dimensionalen Datenhülle D_V , umso stärker begrenzen die im e-dimensionalen Zusammenhang B_V enthaltenen Kalibrationsvariablen k_V die Datenhülle D des zugrundeliegenden Kalibrationsraumes K . Äquivalent dazu könnte natürlich der Volumeninhalt außerhalb der Datenhülle D_V berechnet werden. Dann würde gelten, dass der begrenzende Einfluss auf die Datenhülle des zugrundeliegenden Versuchsraumes umso größer ist, umso größer dieses Volumen ist. In gleicher Weise könnte für die Beurteilung das Verhältnis oder die Differenz des Volumens außerhalb der Datenhülle D_V zum Volumeninhalt F_V der Datenhülle D_V (oder umgekehrt) herangezogen werden. Ebenso könnte ein Verhältnis des Volumeninhalts F_V einer Datenhülle, oder das Volumen außerhalb der Datenhülle D_V mit dem Volumen des im Zusammenhang B_V aufgespannten e-dimensionalen Raumes in Verhältnis gesetzt werden. Das läuft aber alles auf die Bewertung des Volumeninhaltes F_V der Datenhüllen D_V hinaus, und die begrenzende Wirkung der an einem e-dimensionalen Diagramm B_V beteiligten Kalibrationsvariablen k_V wird umso höher bewertet, je kleiner dieser Volumeninhalt F_V ist.

Es werden demnach für den ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} diejenigen d_{sub} Kalibrationsvariablen k_V ausgewählt, die an den Datenhüllen D_V in den e-dimensionalen Zusammenhängen B_V mit den kleinsten Volumeninhalten F_V beteiligt sind.

Dazu kann beispielsweise der e-dimensionale Zusammenhang B_V mit dem kleinsten Volumeninhalt F_V ausgewählt werden und die beteiligten Kalibrationsvariablen k_V zu den d_{sub} Kalibrationsvariablen k_V hinzugefügt werden. Danach wird der Zusammenhang B_V mit dem zweitkleinsten Volumeninhalt F_V ausgewählt und die beiden beteiligten Kalibrationsvariablen k_V werden wieder zu den d_{sub} Kalibrationsvariablen k_V hinzugefügt. Ist eine der beteiligten Kalibrationsvariablen k_V schon in der Menge der ausgewählten Kalibrationsvariablen k_V enthalten, dann wird diese natürlich nicht nochmals hinzugefügt. Das wird solange wiederholt,

bis alle d_{sub} Kalibrationsvariablen k_v ausgewählt wurden. Diese Auswahl legt somit nur fest, welche der d Kalibrationsvariablen k_v des Kalibrationsraumes K im ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} mit der Dimension d_{sub} verwendet werden.

5 Können in einem letzten Schritt nicht alle an einem Zusammenhang B_V beteiligten Kalibrationsvariablen k_v hinzugefügt werden, weil nur mehr eine kleinere Anzahl von auszuwählenden Kalibrationsvariablen k_v fehlt, dann kann beispielsweise einfach die benötigte Anzahl der beteiligten Kalibrationsvariablen k_v beliebig ausgewählt werden. Beispielsweise im zweidimensionalen Fall immer die Kalibrationsvariablen k_v der Abszisse oder der Ordinate. Es könnte aber dieser Zusammenhang B_V auch übersprungen werden und der Zusammenhang
10 B_V mit der nächstgrößten Datenhülle D_V ausgewählt werden, solange ein Zusammenhang B_V gefunden wird, an dem nur mehr die benötigte Anzahl von Kalibrationsvariablen k_v beteiligt ist, die noch nicht in der Menge der d_{sub} ausgewählten Kalibrationsvariablen k_v enthalten ist. Es kann aber auch jegliche andere Strategie zur Auswahl der fehlenden Kalibrationsvariablen k_v implementiert werden.

15 Für den damit festgelegten Unter-Kalibrationsraum mit Dimension $d_{\text{sub}} < d$ kann dann mit den bekannten Datenpunkten \mathbf{x}_n , die natürlich auf die d_{sub} ausgewählten Kalibrationsvariablen k_v reduziert sind, eine beliebige Datenhülle D_{sub} berechnet werden. Nachdem die Dimension d_{sub} ausreichend nieder ist, kann das auch mit herkömmlichen Hüllenalgorithmen, wie dem QuickHull Algorithmus, ausreichend schnell erfolgen.

20 Für die restlichen $(d - d_{\text{sub}})$ Kalibrationsvariablen k_v des Kalibrationsraumes K , die auf die weiteren Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ aufgeteilt werden müssen, kann verschieden vorgegangen werden.

Eine Möglichkeit ist, aus den verbleibenden $(d - d_{\text{sub}})$ Kalibrationsvariablen k_v wieder $d_{\text{sub}2}$ Kalibrationsvariablen k_v , wobei die Dimension $d_{\text{sub}2}$ wieder festgelegt oder vorgegeben sein
25 kann, mit der obigen Methode auszuwählen, um einen Unter-Kalibrationsraum $K_{\text{sub}2}$ zu bestimmen. Das kann natürlich auch für mehrere weitere Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ gemacht werden. Damit können ebenso entsprechende Datenhüllen $D_{\text{sub}2}$ für diese Unter-Kalibrationsräume berechnet werden. Ebenso könnten für die verbleibenden $(d - d_{\text{sub}})$ Kalibrationsvariablen k_v auch einfach die schon ermittelten Datenhüllen D_V der e -dimensionalen
30 Diagramme B_V verwendet werden, was eine besonders schnelle Methode darstellt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die verbleibenden $(d - d_{\text{sub}})$ Kalibrationsvariablen k_v einfach manuell auf weitere Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ aufzuteilen, weil die Kalibrationsvariablen k_v mit der beschränkten Wirkung ohnehin schon im ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} enthalten sind. Auch eine Kombination dieser Möglichkeiten ist denkbar.

Für die verbleibenden $(d - d_{\text{sub}})$ Kalibrationsvariablen k_v könnte aber bei der Kalibrierung auch wie in der WO 2017/198638 A1 beschrieben verfahren werden. Auch das kann natürlich mit den anderen Möglichkeiten kombiniert werden.

5 Für die Erfindung vorteilhaft ist die Zuordnung der d_{sub} Kalibrationsvariablen k_v mit der beschränkten Wirkung zum ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} , die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren systematisch und automatisiert erfolgen kann.

Für die Kalibrierung sind in den Nebenbedingungen g damit anstelle einer einzigen Datenhülle D mit hoher Dimension d mehrere Datenhüllen D_{sub} , $D_{\text{sub}2}$, D_v kleinerer Dimension zu prüfen, was aber an der grundsätzlichen Vorgehensweise der Kalibrierung nichts ändert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Kalibrierung eines technischen Systems, insbesondere eines Verbrennungsmotors, eines Getriebes, eines Hybridantriebs, einer Klimatisierung eines Fahrzeugs, einer elektronisch steuerbaren Federung, einer elektronisch steuerbaren Aufhängung oder einer Fahrzeuglenkung, das durch eine Anzahl k von Steuervariablen (u_k) des technischen Systems gesteuert wird und sich in Abhängigkeit der Steuervariablen (u_k) des technischen Systems ein Betriebspunkt in Form einer Anzahl m von Zustandsvariablen (v_m) des technischen Systems einstellt, wobei bei der Kalibrierung in einem Betriebspunkt durch eine Optimierung unter Einhaltung vorgegebener Nebenbedingungen (h, g) die Steuervariablen (u_k) des technischen Systems ermittelt werden, die hinsichtlich zumindest einer Ausgangsgröße (y) des technischen Systems optimal sind, wobei mit einer Nebenbedingung (g) der Optimierung geprüft wird, ob bei der Optimierung berechnete neue Steuervariablen (u) des technischen Systems innerhalb einer Datenhülle D um eine Anzahl vorhandener Datenpunkte (x_n) des technischen Systems liegt, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein d -dimensionaler Kalibrationsraum K , der die für die Kalibrierung benötigten Kalibrationsvariablen k_v in Form von benötigten Steuervariablen des technischen Systems und benötigten Zustandsvariablen des technischen Systems umfasst, auf einen ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} mit einer Dimension $d_{\text{sub}} < d$ und zumindest einen weiteren Unter-Kalibrationsraum $K_{\text{sub}2}$ aufgeteilt wird, indem
- durch kombinatorische Variationen Teilmengen mit jeweils einer Anzahl e , vorzugsweise $e = 2$, von Kalibrationsvariablen k_v ermittelt werden und aus den sich ergebenden e -dimensionalen Zusammenhängen B_v von Kalibrationsvariablen k_v und anhand der vorhandenen Datenpunkte (x_n) des technischen Systems für jeden e -dimensionalen Zusammenhang B_v eine e -dimensionale Datenhülle D_v berechnet wird,
 - für jede e -dimensionale Datenhülle D_v der Volumeninhalt F_v der Datenhülle D_v geprüft wird,
 - die d_{sub} Kalibrationsvariablen k_v , die den e -dimensionalen Datenhüllen D_v mit den kleinsten Volumeninhalten F_v zugeordnet sind, für den ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} ausgewählt werden,
 - die verbleibenden $d - d_{\text{sub}}$ Kalibrationsvariablen k_v dem zumindest einen weiteren Unter-Kalibrationsraum $K_{\text{sub}2}$ zugewiesen werden oder auf mehrere weitere Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ aufgeteilt werden, und
 - mit den vorhandenen Datenpunkten (x_n) des technischen Systems zumindest für den ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} eine d_{sub} -dimensionale Datenhülle D_{sub} berechnet wird, die bei der Kalibrierung als Nebenbedingung g geprüft wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest ein verbleibender e-dimensionaler Zusammenhang B_V mit nicht für den ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} ausgewählten Kalibrationsvariablen k_V als weiterer Unter-Kalibrationsraum $K_{\text{sub}2}$ verwendet wird und die e-dimensionale Datenhülle D_V dieses e-dimensionalen Zusammenhanges B_V bei der Kalibrierung als Nebenbedingung g geprüft wird.
- 5
3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** alle verbleibenden e-dimensionale Zusammenhänge B_V mit nicht für den ersten Unter-Kalibrationsraum K_{sub} ausgewählten Kalibrationsvariablen k_V als weitere Unter-Kalibrationsräume $K_{\text{sub}2}$ verwendet werden und die e-dimensionalen Datenhüllen D_V dieser e-dimensionalen Zusammenhänge B_V
- 10 bei der Kalibrierung als Nebenbedingung g geprüft werden.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Kalibrierung zumindest ein äußerer Einfluss auf das technische System berücksichtigt wird und die Kalibrationsvariablen k_V den zumindest einen äußeren Einfluss umfassen.

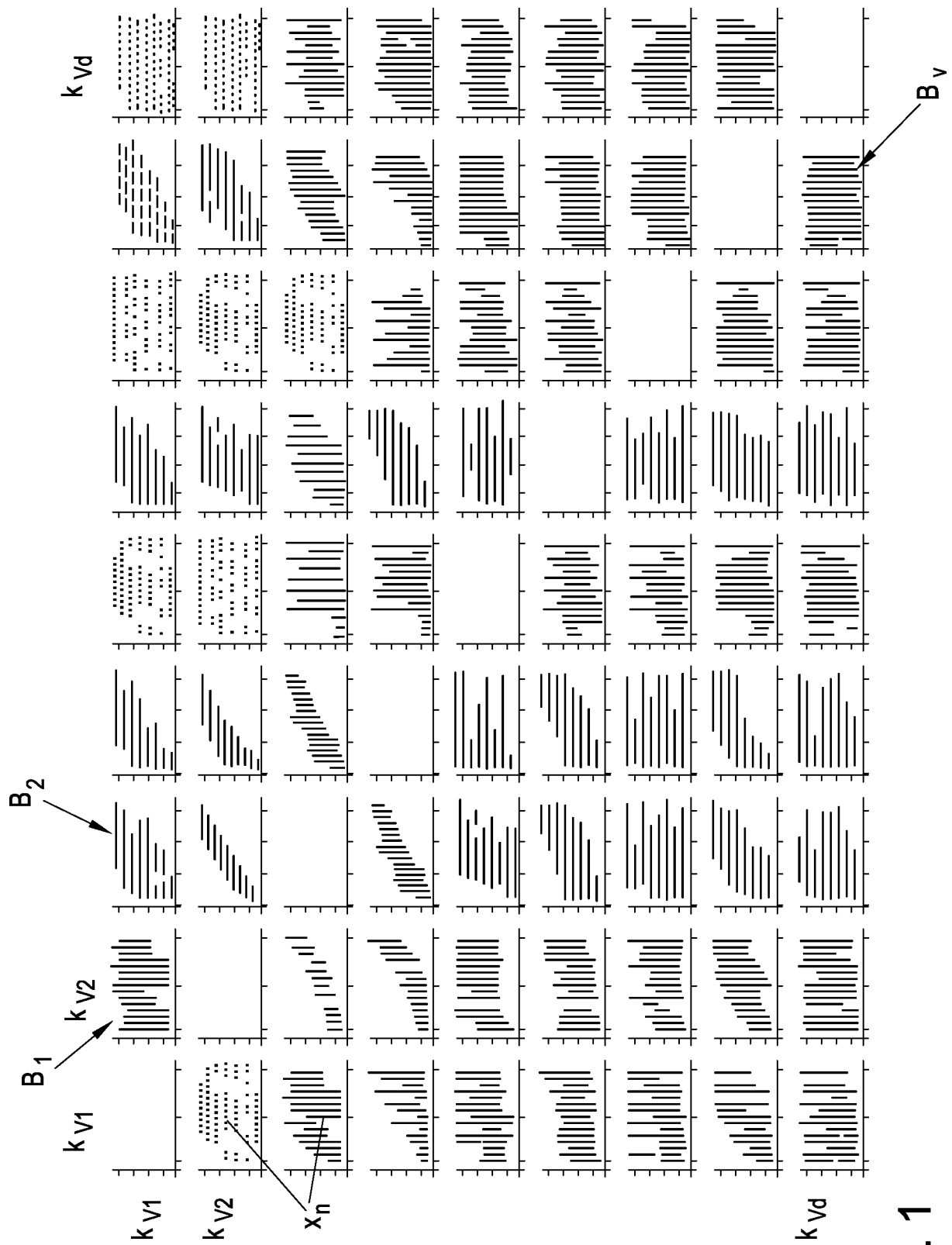


Fig. 1

2/4

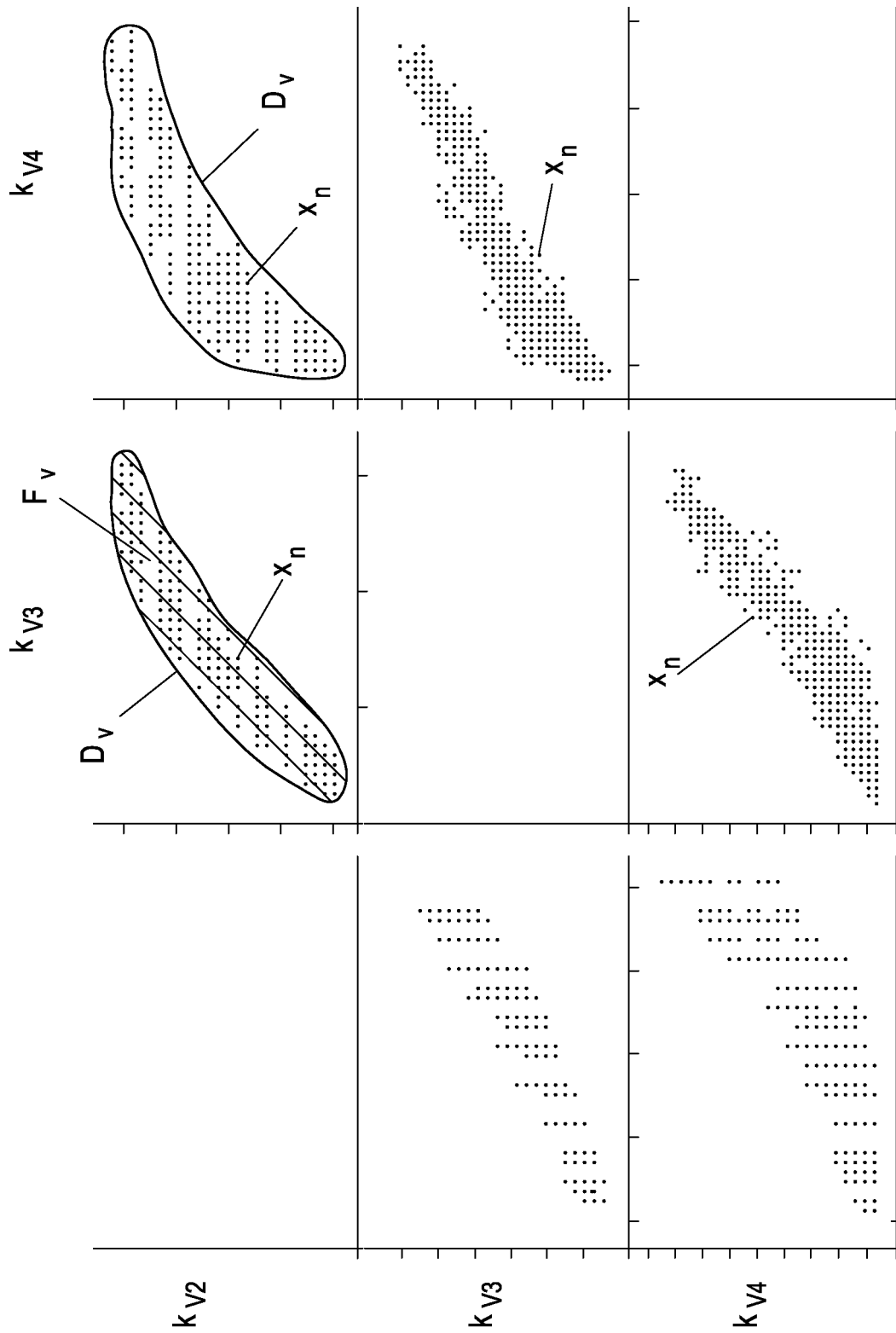


Fig. 2

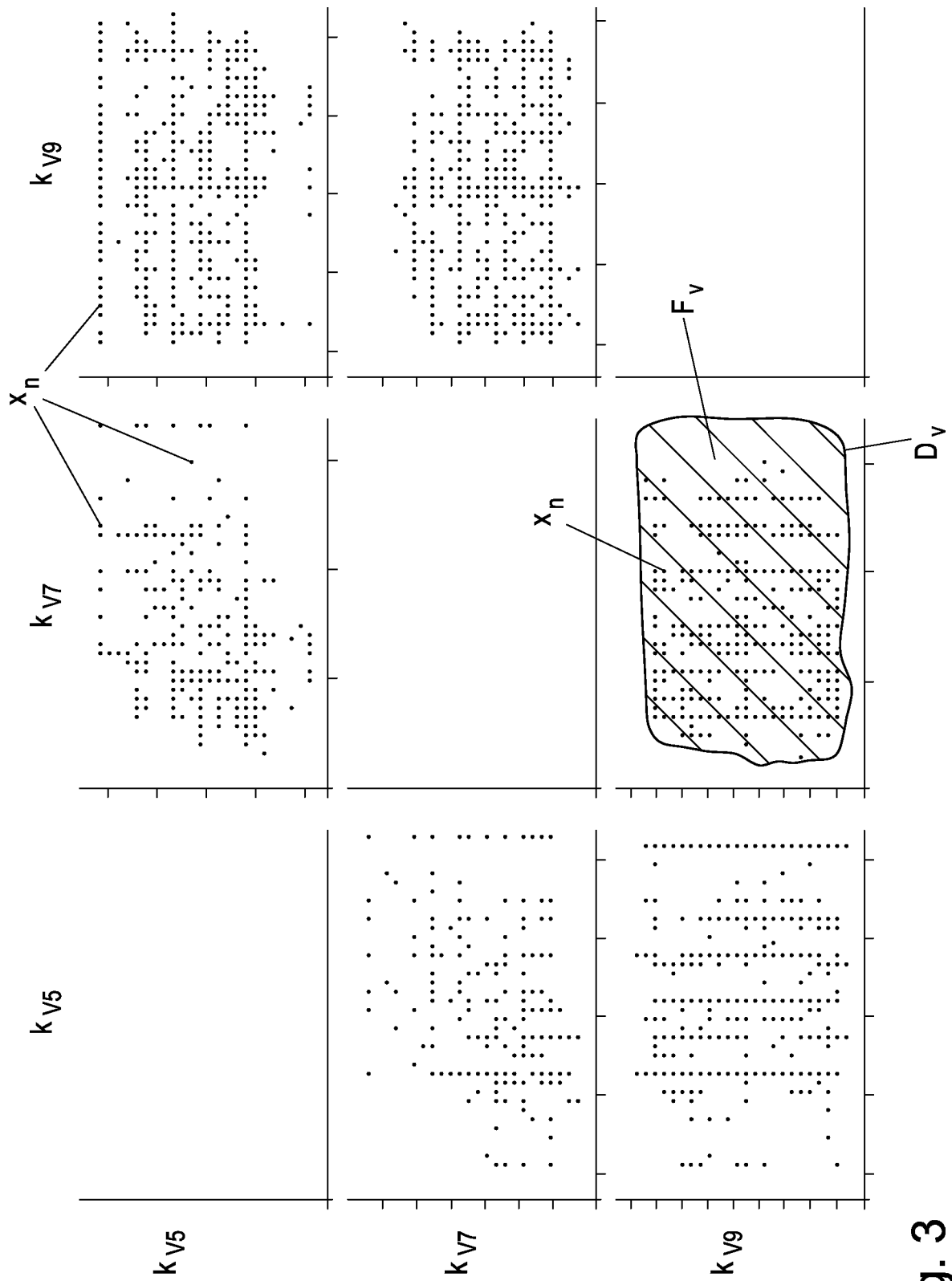


Fig. 3

4/4

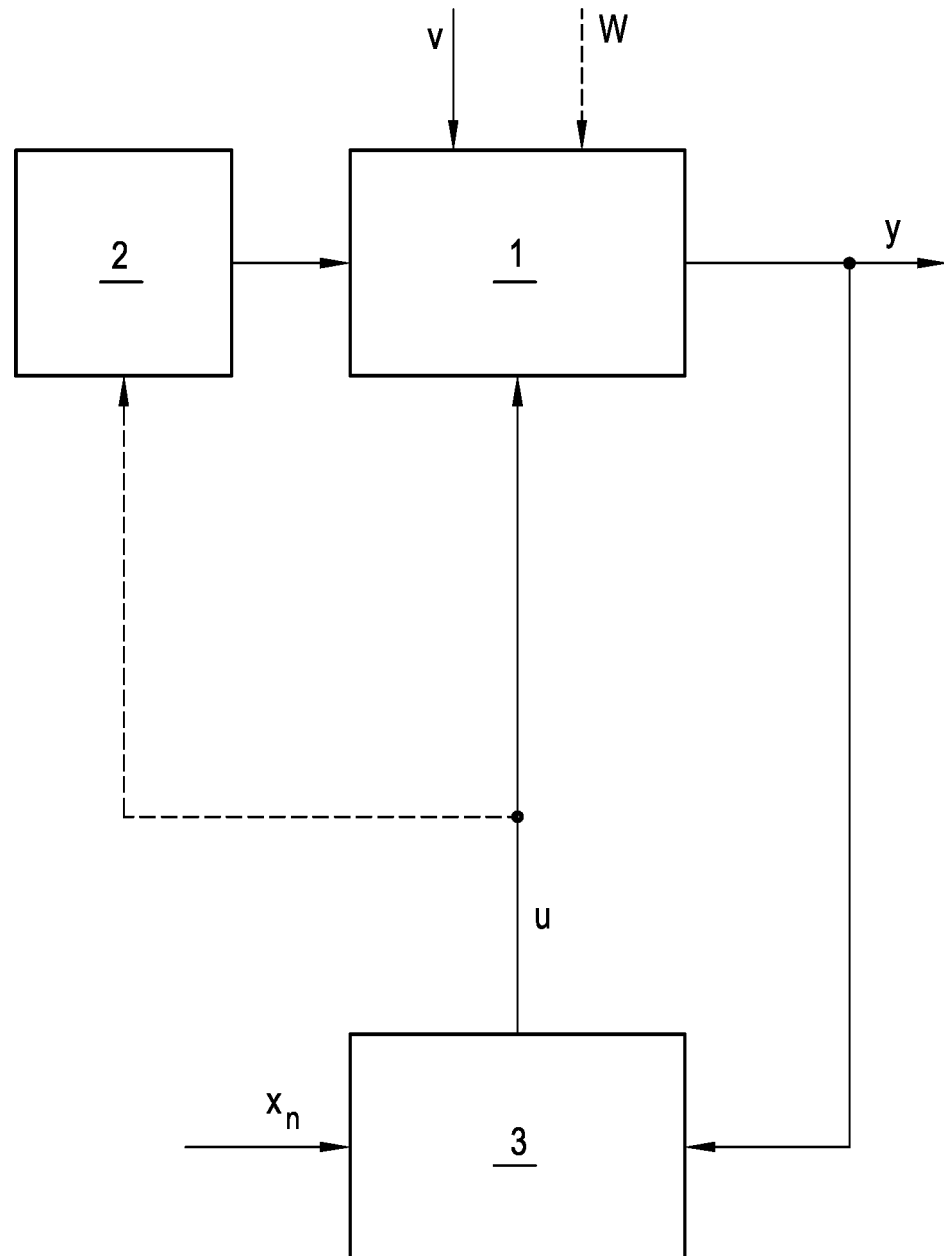


Fig. 4

Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß IPC:
F02D 41/24 (2006.01); **F02D 41/26** (2006.01); **F02D 41/14** (2006.01); **G05B 13/02** (2006.01); **G06F 17/11** (2006.01); **G06F 17/50** (2006.01)

Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß CPC:
F02D 41/2432 (2013.01); **F02D 41/26** (2013.01); **F02D 41/1406** (2013.01); **G05B 13/024** (2013.01); **G06F 17/11** (2013.01); **G06F 17/50** (2013.01); **G06F 17/5095** (2013.01)

Recherchierte Prüfstoff (Klassifikation):
 F02D, G05B, G06F

Konsultierte Online-Datenbank:
 EPDOC , WPI

Dieser Recherchenbericht wurde zu den am **21.06.2018** eingereichten Ansprüchen **1-4** erstellt.

Kategorie*)	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	AT 510328 A2 (AVL LIST GMBH) 15. März 2012 (15.03.2012) Ansprüche 1-3; Figur 1	1-4
A	DE 102015207252 A1 (AVL LIST GMBH) 27. Oktober 2016 (27.10.2016) Zusammenfassung; Figur 1	1-4
A	CN 107856670 A (UNIV JILIN) 30. März 2018 (30.03.2018) Zusammenfassung; Figur 1	1-4
A	DE 102017122168 A1 (STEERING SOLUTIONS IP HOLDING) 29. März 2018 (29.03.2018) Ansprüche 9-15; Figur 1	1-4

Datum der Beendigung der Recherche:
 12.04.2019

Seite 1 von 1

Prüfer(in):
 KOVACS György

*) **Kategorien** der angeführten Dokumente:

- X** Veröffentlichung **von besonderer Bedeutung**: der Anmeldegegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden.
- Y** Veröffentlichung **von Bedeutung**: der Anmeldegegenstand 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.