

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50409/2019
(22) Anmeldetag: 07.05.2019
(43) Veröffentlicht am: 15.08.2020

(51) Int. Cl.: **B29C 45/76** (2006.01)
B29C 45/42 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 10316527 A1
DE 102010052253 A1

(71) Patentanmelder:
ENGEL AUSTRIA GmbH
4311 Schwertberg (AT)

(72) Erfinder:
Oberherber Matthias Dipl.Ing. Dr.
4040 Linz (AT)
Kilian Friedrich Johannes Dipl.Ing. Dr.
4501 Neuhofen an der Krems (AT)

(74) Vertreter:
Mag. Dr. Paul Torggler, Dipl.-Ing. Dr. Stephan
Hofinger, Mag. Dr. Markus Gangl, MMag. Dr.
Christoph Maschler, Dipl.-Ing. (FH) Dr. Bernhard
Hechenleitner, Dipl.-Phys. Dr. Almar Lercher
6020 Innsbruck (AT)

(54) **Verfahren zum Optimieren von Bewegungsabläufen**

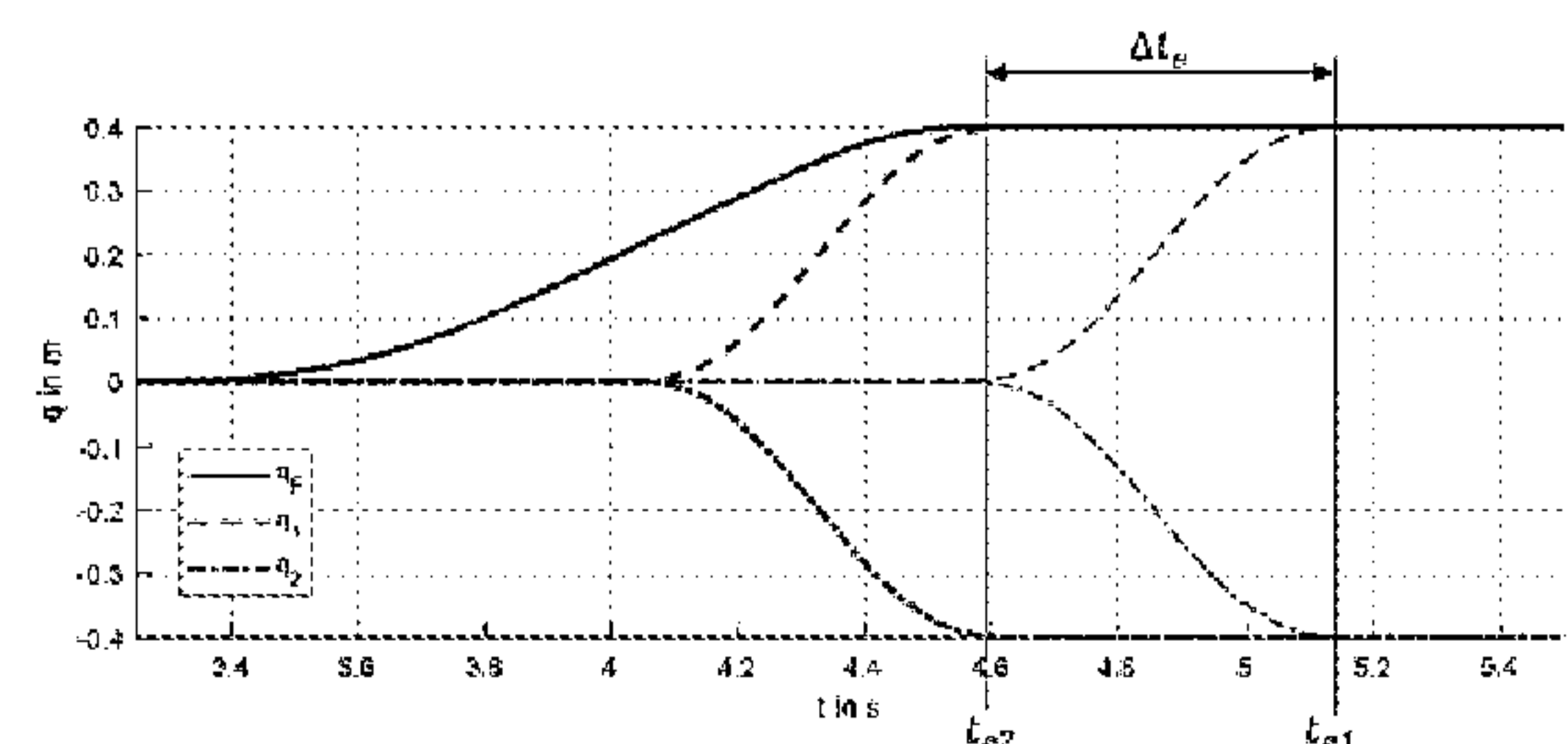
(57) Verfahren zum Optimieren eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs einer einer Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung und eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs zumindest einer ausgewählten Komponente dieser Formgebungsmaschine, wobei die Optimierung hinsichtlich des Gesamtsystems bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine erfolgt, und zumindest folgende Schritte vorgesehen sind:

- Definition von wenigstens einer - vorzugsweise geometrischen und/oder kinematischen und/oder dynamischen - Restriktion hinsichtlich des Bewegungsablaufs der Manipulationsvorrichtung und/oder des Bewegungsablaufs der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine
- Bereitstellen zumindest eines Gütefunktional, wobei sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional nur auf einen der Bewegungsabläufe bezieht und das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen

ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch eine sich auf das Gesamtsystem beziehende Restriktion repräsentiert ist oder sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional auf das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bezieht

- Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für den Bewegungsablauf der Manipulationsvorrichtung und den Bewegungsablauf der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch Extremalisierung des zumindest einen Gütefunktional unter Berücksichtigung der wenigstens einen Restriktion.

Figur 1a



Zusammenfassung:

Verfahren zum Optimieren eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs einer einer Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung und eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs zumindest einer ausgewählten Komponente dieser Formgebungsmaschine, wobei die Optimierung hinsichtlich des Gesamtsystems bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine erfolgt, und zumindest folgende Schritte vorgesehen sind:

- Definition von wenigstens einer - vorzugsweise geometrischen und/oder kinematischen und/oder dynamischen - Restriktion hinsichtlich des Bewegungsablaufs der Manipulationsvorrichtung und/oder des Bewegungsablaufs der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine
- Bereitstellen zumindest eines Gütefunktional, wobei sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional nur auf einen der Bewegungsabläufe bezieht und das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch eine sich auf das Gesamtsystem beziehende Restriktion repräsentiert ist oder sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional auf das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bezieht
- Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für den Bewegungsablauf der Manipulationsvorrichtung und den Bewegungsablauf der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch Extremalisierung des zumindest einen Gütefunktional unter Berücksichtigung der wenigstens einen Restriktion.

(Fig. 1a)

Die Erfindung betrifft ein Verfahren mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1 und/oder des Anspruchs 2 und eine Anordnung mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 8.

DE 10 2006 037 976 B4 beschreibt ein Verfahren zur synchronen Bewegung einer einer Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung und einer Bewegung zumindest einer ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine. Es ergibt sich eine gewisse Verkürzung der Zykluszeit. Dieses Verfahren ist auf eine ausgewählte Komponente in Form einer Formaufspannplatte der Formgebungsmaschine und auf eine Verkürzung der Zykluszeit beschränkt.

Aufgabe der Erfindung ist die Bereitstellung eines gattungsgemäßen Verfahrens bei welchem wählbar ist, in Bezug auf was für ein Gütefunktional eine Optimierung erfolgen soll und das hinsichtlich der ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine universeller einsetzbar ist und einer Anordnung, welche zur Durchführung eines solchen Verfahrens konfiguriert ist.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 und/oder des Anspruchs 2 und eine Anordnung mit den Merkmalen des Anspruchs 8 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Die Grundidee der Erfindung liegt darin, dass die Trajektorien von Bewegungsabläufen der Manipulationsvorrichtung und zumindest einer ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine in Bezug auf ein Gütefunktional in optimierter Weise synchron ausgeführt werden und zwar nicht so, dass jeder Bewegungsablauf für sich optimiert wird, sondern dass sich die Optimierung im Hinblick auf das Gesamtsystem der beiden zu optimierenden Bewegungsabläufe bezieht. Hierdurch können Tot- und Wartezeiten in den einzelnen Bewegungsabläufen vermieden werden.

Die Berücksichtigung des Gesamtsystems erfolgt durch ein sich auf das Gesamtsystem beziehendes Gütefunktional oder durch ein Gütefunktional, welches sich nur auf einen der beiden zu optimierenden Bewegungsabläufe bezieht. Im letzteren Fall erfolgt der

Bezug auf das Gesamtsystem über den Einfluss des anderen Bewegungsablaufs auf die zu wählenden Restriktionen.

Nicht nur die Startzeitpunkte für die einzelnen Bewegungsabläufe sondern die Trajektorien (d. h. die zurückgelegten Bahnen als Ganzes von einem Startpunkt bis zu einem Endpunkt einschließlich der zwischen diesen Punkten liegenden Punkte) für die einzelnen Bewegungsabläufe werden festgelegt (d. h. ermittelt oder berechnet).

Anstelle eines Startpunktes könnte ein Startbereich definiert werden, d. h. Geschwindigkeit und Position können in einer gewissen Form variabel, aber (nicht vorab) bekannt sein. Der Startpunkt selbst könnte eine Optimierungsvariable sein. Der Endpunkt ist bevorzugt in einem relativ zum Werkzeug (auch als „Form“ bezeichnet) festen Koordinatensystem definiert und kann relativ zum Raum eine variable Position und eine Geschwindigkeit besitzen.

Ein Startparameterset kann aus einer vorab optimierten Trajektorie oder einer in einem Arbeitszyklus gemessenen Trajektorie stammen.

Für die Optimierung ist eine Definition von geometrischen und/oder kinematischen und/oder dynamischen und/oder prozesstechnischen Restriktionen hinsichtlich des Bewegungsablaufs der Manipulationsvorrichtung und/oder des Bewegungsablaufs der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine erforderlich.

Die Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für den Bewegungsablauf der Manipulationsvorrichtung und/oder den Bewegungsablauf der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine kann in an sich bekannter Weise durch Extremalisierung des Gütefunktional unter Berücksichtigung der Restriktionen erfolgen.

Die Manipulationsvorrichtung kann beispielsweise in Form einer Handlingvorrichtung (Roboter) ausgebildet sein, wobei an einem Endpunkt (TCP – „tool center point“) der Handlingvorrichtung ein relativ zur Handlingvorrichtung bewegbarer Greifer angeordnet sein kann.

Als Beispiel sei die Optimierung eines Gesamtsystems bestehend aus einem Greifer, einer Handlingvorrichtung (als Beispiel einer der Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung) und eines Werkzeugs einer Formgebungsmaschine (als Beispiel für die wenigstens eine ausgewählte Komponente der Formgebungsmaschine) diskutiert.

Das Beispiel umfasst die Schritte:

- Bereitstellen eines mathematischen Modells für beide Mehrkörpersysteme (Handlingvorrichtung und Greifer einerseits und Formgebungsmaschine mit Werkzeug andererseits)
- Bestimmung der Restriktionen (Nebenbedingungen), z. B.:
 - Minimaler Abstand zwischen Handlingvorrichtung und Greifer und Werkzeug
 - Einhaltung des minimalen Abstands auch im Falle eines Not-Halt
- Festlegung der Startbedingungen/Randbedingungen
- Wahl eines gemeinsamen Gütefunktional für die Handlingvorrichtung, den Greifer und das Werkzeug, z. B. in Bezug auf:
 - Zykluszeit - insbesondere die Zeit, um welche die Entnahme durch die Handlingvorrichtung und den Greifer verlängert wird
 - Energiebedarf für die Bewegungen
- Parametrierung der Trajektorien (Punkt-zu-Punkt Optimierung) als Funktion eines Bahnparameters
- Durchführung der Optimierung online oder offline durch Lösung des Optimierungsproblems oder alternativ durch iterative Anpassung der Bewegungsabläufe auf Basis von Simulations- oder Messdaten

Sind bereits Bewegungsabläufe für die Manipulationsvorrichtung oder die ausgewählte Komponente der Formgebungsmaschine festgelegt, so kann mittels der Erfindung bei Änderung eines der Bewegungsabläufe eine optimierte Anpassung des anderen Bewegungsablaufs erfolgen. Hierzu erfolgt die Bereitstellung einer Trajektorie in Bezug auf den geänderten Bewegungsablauf.

Durch die Formgebungsmaschine vorgegebene (bestehend aus hardwaretechnischen oder sicherheitstechnischen) Restriktionen für beide Bewegungsabläufe müssen berücksichtigt werden. Zusätzlich können durch einen Bediener variable

(prozessabhängige) Restriktionen für eine oder beide Bewegungsabläufe eingegeben werden.

Es kann ein Gütefunktional in Bezug auf das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bereitgestellt werden.

Es erfolgt eine Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für die andere Bewegung durch Extremalisierung des Gütefunktionals unter Berücksichtigung der Restriktionen.

Beispiele für Restriktionen sind (z. B. dynamische) Störkonturen und/oder Positionen, die zu bestimmten Zeiten erreicht sein müssen. Restriktionen können in Form von Straftermen im Gütefunktional berücksichtigt werden.

Das Gütefunktional kann sich auf eine gesamte Zykluszeit eines Arbeitszyklus der Formgebungsmaschine oder eine Teilzeit der gesamten Zykluszeit der Formgebungsmaschine beziehen. Alternativ oder zusätzlich kann sich das Gütefunktional auf den Energiebedarf beider Bewegungen beziehen. Dies kann von der elektrischen Architektur des Gesamtsystems abhängen (z. B. arbeitspunktabhängiger Wirkungsgrad einer Rückspeiseeinheit).

Bei der Formgebungsmaschine handelt es sich bevorzugt um eine Kunststoff-Spritzgießmaschine.

Bei der Manipulationsvorrichtung handelt es sich bevorzugt um eine Handlingvorrichtung mit einem Arm oder mehreren Armen und gegebenenfalls inklusive eines Greifers.

Die Optimierung kann in einem einzigen Schritt so erfolgen, dass das Optimierungsproblem mit einem Optimierungstool gelöst wird. Die Optimierung kann alternativ iterativ so erfolgen, dass zunächst ein erster Bewegungsablauf für die Manipulationsvorrichtung und/oder die Formgebungsmaschine gefahren wird und das sich für diesen Bewegungsablauf bzw. Bewegungsabläufe ergebende Gütefunktional berechnet wird und anschließend eine Modifikation des Bewegungsablaufs oder der

Bewegungsabläufe so durchgeführt wird, dass sich dann das für den modifizierten Bewegungsablauf oder die modifizierten Bewegungsabläufe ergebende Gütefunktional größer oder kleiner (je nach Optimierungsproblem) ist. Dies wird sooft durchgeführt, bis sich keine wesentliche Änderung des Gütefunktionals mehr ergibt. Diese Iterative Anpassung kann dabei sowohl auf Basis realer Messdaten als auch mittels Simulationsergebnissen erfolgen.

Ausführungsbeispiel:

Als Beispiel sei eine Entnahme eines in einem Werkzeugteil eines Werkzeugs der Formgebungsmaschine geformten Teils durch einen am TCP einer Handlingvorrichtung angeordneten Greifer genannt, wobei das Werkzeugteil an einer bewegbaren Formaufspanplatte der Formgebungsmaschine angeordnet sei:

- Hier bietet sich eine Teilung des Optimierungsproblems an:
 - Trajektorie der Handlingvorrichtung und des Greifers zum Entnahmepunkt (Einfahren und Entformen) und Öffnungstrajektorie des Werkzeugteils und Entformungstrajektorie des Werkzeugs
 - Trajektorie der Handlingvorrichtung und des Greifers vom Entnahmepunkt (Ausfahren) und ggf. Schließtrajektorie des Werkzeugteils
- Ausgangssituation der Optimierung:
 - die Trajektorie der Handlingvorrichtung und des Greifers ist Teil der Optimierung und wird nicht vorgegeben (nur Randbedingungen wie Start- und Endpunkt oder Start- oder Endbereich)
 - das dynamische Modell der Handlingvorrichtung, des Greifers und der Formgebungsmaschine ist bekannt (evtl. sogar das elastische Modell, welches neben den Starrkörperbewegungen auch die elastischen Bewegungen beinhaltet):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{G}(\mathbf{s}, \mathbf{v})) \end{bmatrix},$$

- wobei der Vektor \mathbf{s} die Positionen der Handlingvorrichtung, des Greifers und der Formgebungsmaschine repräsentiert, der Vektor \mathbf{v} die Geschwindigkeiten der Handlingvorrichtung, des Greifers und der Formgebungsmaschine repräsentiert, die Massenmatrix \mathbf{M} die Massen der Handlingvorrichtung, des

Greifers und der Formgebungsmaschine repräsentiert, der Vektor F die Eingangskräfte (z. B. Systemeingänge oder Motormomente) repräsentiert und der Vektor G weitere dynamische (Stör-)Einflüsse repräsentiert.

- Die maximalen Momente, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, ... der Handlingvorrichtung und des Greifers sind bekannt (auch für den Not-Halt Fall)
 - die maximalen Momente, Beschleunigungen, Geschwindigkeiten, ... der Formgebungsmaschine sind bekannt (auch für den Not-Halt Fall)
 - die aktuellen Istwerte der Formgebungsmaschine können bekannt sein
- Formulierung des Optimierungsproblems zur Berechnung einer optimalen Trajektorie:

Die oben angeführten Bedingungen lassen sich folgendermaßen als Optimierungsproblem formulieren:

$$\min_{\mathbf{u}(\cdot)} \left[J = M(\mathbf{x}(t_e)) + \int_0^{t_e} L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \right]$$

unter Berücksichtigung von

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad \forall t \in [0, t_e]$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}(t_e)) = 0$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0$$

Das zu minimierende Gütefunktional J - im Allgemeinen auch als Bolza Gütefunktional bezeichnet – setzt sich aus einer Funktion des Endzustandes (Mayer Term $M(\mathbf{x}(t_e))$, nicht zu verwechseln mit der Massenmatrix) und einem integralen Anteil (Lagrange Term $L(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$) zusammen. Letzterer kann dabei sowohl eine Funktion der Steuergrößen / Optimierungsvariablen $\mathbf{u}(t)$ als auch der Systemzustände $\mathbf{x}(t)$ sein. t_e ist die Trajektoriendauer.

Beschränkungen und Restriktionen können dabei in Form eines dynamischen Systems $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t))$, als Gleichungsbedingungen $\mathbf{g}(\mathbf{x}(t_e)) = 0$ oder in Form von Ungleichungsbedingungen $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq 0$ berücksichtigt werden.

- Vorgangsweise zur Berechnung einer optimalen Trajektorie:
 - Erarbeiten einer Problembeschreibung
 - Definition Optimierungsvariablen
 - Definition von Restriktionen
 - Bereitstellen eines Gütefunktional

Problembeschreibung:

- Trajektorie zum Entnahmepunkt:
 - Festlegen des Startpunktes oder Startbereichs (Zeitpunkt frei), die Handlingvorrichtung und der Greifer befinden sich außerhalb des Schließbereiches (das ist der Bewegungsbereich) der Formgebungsmaschine
 - Festlegen des Entnahmepunktes oder des Entnahmebereichs. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, z. B.:
 - fester Ort, feste Geschwindigkeit, fester Zeitpunkt
 - Bereich des Orts, Bereich einer Geschwindigkeit, Bereich eines Zeitpunkts
 - Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte variabel aber zeitlich vorab bekannt -> synchronisieren der Bahn der Handlingvorrichtung und des Greifers mit der Bahn der bewegbaren Formaufspannplatte
 - Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte variabel aber in Echtzeit bekannt -> synchronisieren der Bahn der Handlingvorrichtung und des Greifers mit der Bahn der bewegbaren Formaufspannplatte
 - Festlegen eines Kontaktpunktes der Handlingvorrichtung und des Greifers mit einem Übernahmekopf oder einem Werkzeugteil der Formgebungsmaschine. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, z. B.:
 - Fester oder berechenbarer Ort, Zeitpunkt über die Freigabe (durch die Bewegung der bewegbaren Formaufspannplatte) veränderbar
 - Kontaktpunkt als Funktion von Ort und Zeit durch die Bewegung der bewegbaren Formaufspannplatte vorab bekannt
 - Kontaktpunkt als Funktion von Ort und Zeit durch die Bewegung der bewegbaren Formaufspannplatte in Echtzeit bekannt
- Trajektorie vom Entnahmepunkt:

- Festlegen des Endpunktes (fester Ort des Greifers, Zeitpunkt frei) oder eines Endbereichs, Handlingvorrichtung und Greifer befinden sich außerhalb des Schließbereiches der Formgebungsmaschine
- Festlegen des Entnahmepunktes oder eines Endbereichs. Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, z. B.:
 - Fester Ort, feste Geschwindigkeit, Zeitpunkt fest und bekannt
 - Bereich des Orts, Bereich einer Geschwindigkeit, Bereich eines Zeitpunkts (Zeitraum)
 - Ort variabel aber zeitlich vorbekannt, Geschwindigkeit variabel aber zeitlich vorbekannt, Zeitpunkt fest und bekannt
 - Ort variabel und Teil der Optimierung (oder äquivalent: Differenz einer absoluten Position des Greifers und der Handlingvorrichtung relativ zur beweglichen Formaufspannplatte)

Optimierungsvariablen:

- Version 1a:
 - Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie der Handlingvorrichtung und des Greifers wird durch die Optimierung bestimmt.
 - Soll-Bahn der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine sind vorab bekannt.
 - Entnahmepunkt ist zeitlich und örtlich bekannt. Es gibt keine Anpassung des Entnahmepunkts auf eine Isttrajektorie.
 - Annahme: Formgebungsmaschine folgt ideal ihrer Trajektorie.
 - Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche der Handlingvorrichtung und des Greifers sind fixiert.
- Version 1b:
 - Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie des Greifers und der Handlingvorrichtung wird durch die Optimierung bestimmt.
 - Soll - Bahn der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine sind vorab bekannt.

- Berechnung der idealen (nach einem mechatronischen Modell berechneten) Ist - Bahn der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine.
 - Entnahmepunkt ist zeitlich und örtlich bekannt. Es gibt keine Anpassung des Entnahmepunkts auf eine Istbahn.
 - Annahme: Formgebungsmaschine folgt ihrer Trajektorie mit dem berechneten physikalischen Verhalten, sodass die berechnete Ist - Bahn gut mit der tatsächlichen Ist - Bahn übereinstimmt.
 - Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche der Handlingvorrichtung und des Greifers sind fixiert.
- Version 1c:
- Zusatz zu Version 1a und/oder 1b
 - Wenn keine Veränderung, welche die Werkzeug-Bewegung beeinflussen, durchgeführt wurden, kann das Optimierungsergebnis aus dem vorherigen Zyklus verwendet werden. Eine solche Vorgehensweise kann auch bei den nachstehend diskutierten Versionen 2 bis 5 erfolgen.
- Version 2:
- Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie des Greifers und der Handlingvorrichtung wird durch die Optimierung bestimmt.
 - Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine sind vorab bekannt (immer gleich).
 - Entnahmepunkt wird zeitlich und örtlich von der Optimierung bestimmt. Der Greifer und die Handlingvorrichtung sind im Entnahmepunkt in dem Sinne bewegungssynchronisiert als sie die gleiche Geschwindigkeit wie die bewegbare Formaufspannplatte aufweisen.
 - Annahme: Formgebungsmaschine folgt ideal ihrer Trajektorie.
 - Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche des Greifers und der Handlingvorrichtung sind fixiert.
- Version 3:
- Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie des Greifers und der Handlingvorrichtung werden durch die Optimierung bestimmt.

- Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine sind vorab nicht bekannt und werden einer Bewegungssteuerung des Greifers und der Handlingvorrichtung in Echtzeit bekannt gegeben.
 - Entnahmepunkt wird zeitlich und örtlich von der Optimierung bestimmt. Der Greifer und die Handlingvorrichtung sind im Entnahmepunkt in dem Sinne bewegungssynchronisiert (in Echtzeit) als sie die gleiche Geschwindigkeit wie die bewegbare Formaufspannplatte aufweisen.
 - Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche des Greifers und der Handlingvorrichtung sind fixiert.
- Version 4:
- Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie des Greifers und der Handlingvorrichtung wird durch die Optimierung bestimmt.
 - Der zeitliche Verlauf der Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine werden durch die Optimierung bestimmt.
 - Entnahmepunkt wird zeitlich und örtlich von der Optimierung bestimmt. Der Greifer und die Handlingvorrichtung sind im Entnahmepunkt in dem Sinne bewegungssynchronisiert als sie die gleiche Geschwindigkeit wie die bewegbare Formaufspannplatte aufweisen.
 - Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche des Greifers und der Handlingvorrichtung sind fixiert.
- Version 5:
- Der zeitliche und geometrische Verlauf der Trajektorie des Greifers und der Handlingvorrichtung werden durch die Optimierung bestimmt.
 - Der zeitliche Verlauf der Trajektorie der bewegbaren Formaufspannplatte und eines Auswerfers der Formgebungsmaschine werden durch die Optimierung bestimmt.
 - Entnahmepunkt wird zeitlich und örtlich von der Optimierung bestimmt. Der Greifer und die Handlingvorrichtung sind im Entnahmepunkt in dem Sinne bewegungssynchronisiert (in Echtzeit) als sie die gleiche Geschwindigkeit wie die bewegbare Formaufspannplatte aufweisen.

- Startpunkte und Endpunkte oder die dazugehörigen Bereiche des Greifers und der Handlingvorrichtung sind fixiert.

Nebenbedingungen:

- Keine Kollision zwischen Greifer, Handlingvorrichtung und Formgebungsmaschine:
 - Keine Verletzung des zeitlich variablen Arbeitsraumes von Handlingvorrichtung, Greifer und Formgebungsmaschine.
 - Keine Verletzung des zeitlich variablen Arbeitsraums von Handlingvorrichtung und Formgebungsmaschine bei Notaus von Formgebungsmaschine und/oder Handlingvorrichtung.
- Kinematische Grenzwerte der Formgebungsmaschine und der Handlingvorrichtung und des Greifers dürfen nicht überschritten werden.
- Kinetische Grenzwerte der Formgebungsmaschine (nicht linear) und der Handlingvorrichtung und des Greifers dürfen nicht überschritten werden.
- Definition (kann auch variabel sein) des Entnahmepunkts:
 - Zeitpunkt oder Zeitdauer
 - Zeitpunkt, zu welchem eine absolute Position eines Auswerfers des Werkzeugs der Formgebungsmaschine, der Handlingvorrichtung und des Greifers zumindest annähernd äquivalent sind
 - Zeitpunkt, zu welchem sich eine Geschwindigkeit des Werkzeugs der Formgebungsmaschine und des Greifers und der Handlingvorrichtung nicht mehr als um ein vorbestimmtes Maß unterscheiden
- Öffnungsweg > Entformungsweg
- Maximale Schwingungen oder Biegemomente in der Handlingvorrichtung dürfen nicht überschritten werden.

Gütefunktional (verschiedene Möglichkeiten):

- Zeitoptimierung:
 - Minimierung einer Verlängerung einer Entnahmezeit durch Eingriff der Handlingvorrichtung und des Greifers im Vergleich zu einer Öffnungszeit der Formgebungsmaschine ohne Eingriff der Handlingvorrichtung und des Greifers.

- Event. könnte ein elastisches Modell mitberechnet werden und in die Optimierung eingehen, um Schwingungen des Gesamtsystems und somit die Einschwingdauer zu minimieren.
- Energieoptimierung
- Stabilität hinsichtlich Schwingungen der Handlingvorrichtung (Bahn, Dynamik, Reibungen, Kollisionen usw.)
- Wärmeentwicklung in den elektrischen Komponenten (Schaltschrank, Regler, ...)
- Optimal hinsichtlich einer Spitzenwertbelastung der Handlingvorrichtung und/oder der Formgebungsmaschine
- Gewichtung von verschiedenen Kriterien (Zeit, Energie, Spitzenwert usw.)
- Prozessstabilität hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie etwa Gesamtzykluszeit.

Alternativ oder zusätzlich könnte in ähnlicher Weise das Einlegen eines Einlegeteils durch die Handlingvorrichtung und den Greifer (als der Formgebungsmaschine zugeordnete Manipulationsvorrichtung) in ein Werkzeug der Formgebungsmaschine (als ausgewählte Komponente der Formgebungsmaschine) behandelt werden.

Für die Zwecke der Erfindung wird ein hergestelltes Formteil und Ähnliches (wie bspw. ein Ausguss) solange als Komponente der Formgebungsmaschine verstanden, wie es sich im Bereich der Formgebungsmaschine befindet, insbesondere damit bewegungsgekoppelt ist.

Alternativ oder zusätzlich könnte in ähnlicher Weise das Entfernen des Angusses durch die Handlingvorrichtung und den Greifer (als der Formgebungsmaschine zugeordnete Manipulationsvorrichtung) behandelt werden.

Die Durchführung der Optimierung bei einer erfindungsgemäßen Formgebungsmaschine durch einen Bediener kann wie folgt erfolgen:

- Beispielsweise kann bequem eine Auswahl der Optimierungsvariablen der oben diskutierten Varianten 1 – 5 in einer Combobox (Drop-Down-Menü) und/oder anschaulichen Symbolbildern erfolgen.
- Ebenso kann eine bequeme Auswahl des Gütefunktionalis erfolgen.
- Eine Startposition für die Handlingvorrichtung kann geteacht (oder vorteilhafterweise auch optimiert werden) werden.

- Eine Grenzposition für die Formgebungsmaschine und die Handlingvorrichtung kann geteacht (oder automatisiert ermittelt) werden:
 - Werkzeugbereich der Formgebungsmaschine öffnen
 - Greifer der Handlingvorrichtung fährt in eine minimale Position in die Formgebungsmaschine, so dass diese möglichst weit schließen kann
 - Formgebungsmaschine schließt bis unmittelbar vor einer Kollision mit dem Greifer
 - Greifer fährt soweit aus der Formgebungsmaschine, dass diese schließen kann.
- Entnahmeposition
 - Eine Entnahmeposition für die Handlingvorrichtung kann geteacht (oder vorteilhafterweise auch optimiert werden) werden.
 - Kann in einem formfesten Koordinatensystem in Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, ... fixiert werden.
 - Kann mittels externen Sensorikausrüstungen automatisch ermittelt werden, wie etwa einem Kamerasystem oder einer Positionierung mit RFID oder NFS Systemen.

Für einen konkreten Anwendungsfall würde sich beispielsweise nachfolgendes Gütefunktional anbieten.

$$\min_{F(\cdot)} \left[J = \int_0^{t_e} (k_1 + k_2 \mathbf{F}^T \mathbf{F}) dt \right]$$

unter Berücksichtigung von:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{s} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F} - \mathbf{G}(\mathbf{s}, \mathbf{v})) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_0 \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}(t_e) = \mathbf{x}_e$$

$$\mathbf{F}_{min} \leq \mathbf{F} \leq \mathbf{F}_{max}$$

$$\mathbf{v} \leq \mathbf{v}_{max}$$

Dabei wird der Mayer Term beispielsweise mit $M(\mathbf{x}(t_e)) = 0$ gewählt. Mit den Gewichtungsfaktoren k_1 und k_2 erfolgt eine Gewichtung zwischen Zeit- und Energieoptimalität. Der Sonderfall $k_1 = 1$ und $k_2 = 0$ liefert die zeitoptimale Lösung. t_e ist die Trajektoriendauer. Die erste Nebenbedingung beschreibt das dynamische System mit den Zuständen \mathbf{s} (Position) und \mathbf{v} (Geschwindigkeit). \mathbf{M} kennzeichnet die

Massenmatrix, der Term $G(s, v)$ enthält alle übrigen und eventuell nichtlinearen Terme, wie Reibungen oder Gravitationsterme. Der Startzustand des Systems wird in Form von Anfangsbedingungen für Position $s(t = 0) = s_0$ und Geschwindigkeit $v(t = 0) = v_0$ festgelegt. Das Erreichen eines definierten Endzustandes wird durch die Gleichungsbedingung $x(t_e) = x_e$ mit $x_e = [s_e \ v_e]^T$ gefordert.

Stellgrößen- sowie Zustandsbeschränkungen können in Form von Ungleichungsbedingungen berücksichtigt werden ($F_{min} \leq F \leq F_{max}$, $v \leq v_{max}$).

Die Vorteile einer gesamtheitlichen Optimierung sollen durch die nachfolgenden beispielhaften Signalverläufe verdeutlicht werden.

Figur 1a zeigt eine Gegenüberstellung eines Standardzyklus nach dem Stand der Technik und einer zeitoptimierten Lösung:

Der Roboter startet mit der Bewegung (q_1 und q_2), sobald die Form (q_F) die Endposition erreicht hat (dünne Linien, Trajektoriendauer t_{e1}) - mit einer zeitoptimalen Lösung - Roboter erhält Frühstartsignal und synchronisiert sich schnellstmöglich auf die Form (dicke Linien, Trajektoriendauer t_{e2}), wobei die Reduktion der Zykluszeit Δt_e deutlich auszumachen ist. Weiters dargestellt ist der gesamte Energieaufwand E (vgl. Figur 1b) für die Roboter- und Formbewegung (zeitoptimal: dicke Linie, nicht optimiert: dünne Linie).

Bei einer zeitoptimalen Bahnplanung der Einzelkomponenten fährt jede Komponente für sich so schnell wie möglich. Es zeigt sich, dass die Optimierung der Einzelbewegungen nicht zwangsläufig zu einem Optimum des Gesamtsystems führt, was zum einen zu unnötigen Stillstandszeiten der Einzelkomponenten und zum anderen zu einem vermeidbar hohen Energieverbrauch führen kann.

Durch eine gesamtheitliche Betrachtung ist es jedoch möglich, die Entnahmezeit auf ein technologisch mögliches Minimum zu reduzieren und gleichzeitig den Energieaufwand zu minimieren (vgl. Fig. 2).

Wie Figur 2a beispielhaft zeigt, erreicht die Form q_F die Endposition zum Zeitpunkt t_{Fe1} und somit schneller als der Roboter (q_1 und q_2) und muss dort auf diesen warten (dünne Linien). Durch die gesamtheitliche Optimierung (dicke Linien) erhöht sich zwar die Trajektoriendauer der Form auf t_{Fe2} , auf die Gesamtdauer der Entnahme hat dies jedoch keinen Einfluss. Durch die reduzierte Dynamik der Form ergibt sich eine Energieeinsparung (vgl. niedrigere dicke Linie in Figur 2b).

Eine Berechnung der Optimierung kann in einer lokalen Steuerung der Formgebungsmaschine und/oder der Handlingvorrichtung oder über eine Datenfernverbindung in einem entfernten Rechner erfolgen.

Bevorzugt ist eine berechnete optimierte Trajektorie Teil eines Teiledatensatzes für die konkrete Formgebungsmaschine und die konkrete ausgewählte Komponente der Formgebungsmaschine.

Innsbruck, am 6. Mai 2019

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Optimieren eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs einer einer Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung und eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs zumindest einer ausgewählten Komponente dieser Formgebungsmaschine, dadurch gekennzeichnet, dass die Optimierung hinsichtlich des Gesamtsystems bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine erfolgt, und zumindest folgende Schritte vorgesehen sind:
 - Definition von wenigstens einer - vorzugsweise geometrischen und/oder kinematischen und/oder dynamischen - Restriktion hinsichtlich des Bewegungsablaufs der Manipulationsvorrichtung und/oder des Bewegungsablaufs der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine
 - Bereitstellen zumindest eines Gütefunktional, wobei sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional nur auf einen der Bewegungsabläufe bezieht und das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch eine sich auf das Gesamtsystem beziehende Restriktion repräsentiert ist oder sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional auf das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bezieht
 - Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für den Bewegungsablauf der Manipulationsvorrichtung und den Bewegungsablauf der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch Extremalisierung des zumindest einen Gütefunktional unter Berücksichtigung der wenigstens einen Restriktion.
2. Verfahren zum Optimieren eines zumindest eine durchzuführende Bewegung aufweisenden Bewegungsablaufs einer einer Formgebungsmaschine zugeordneten Manipulationsvorrichtung oder eines zumindest eine durchzuführende Bewegung

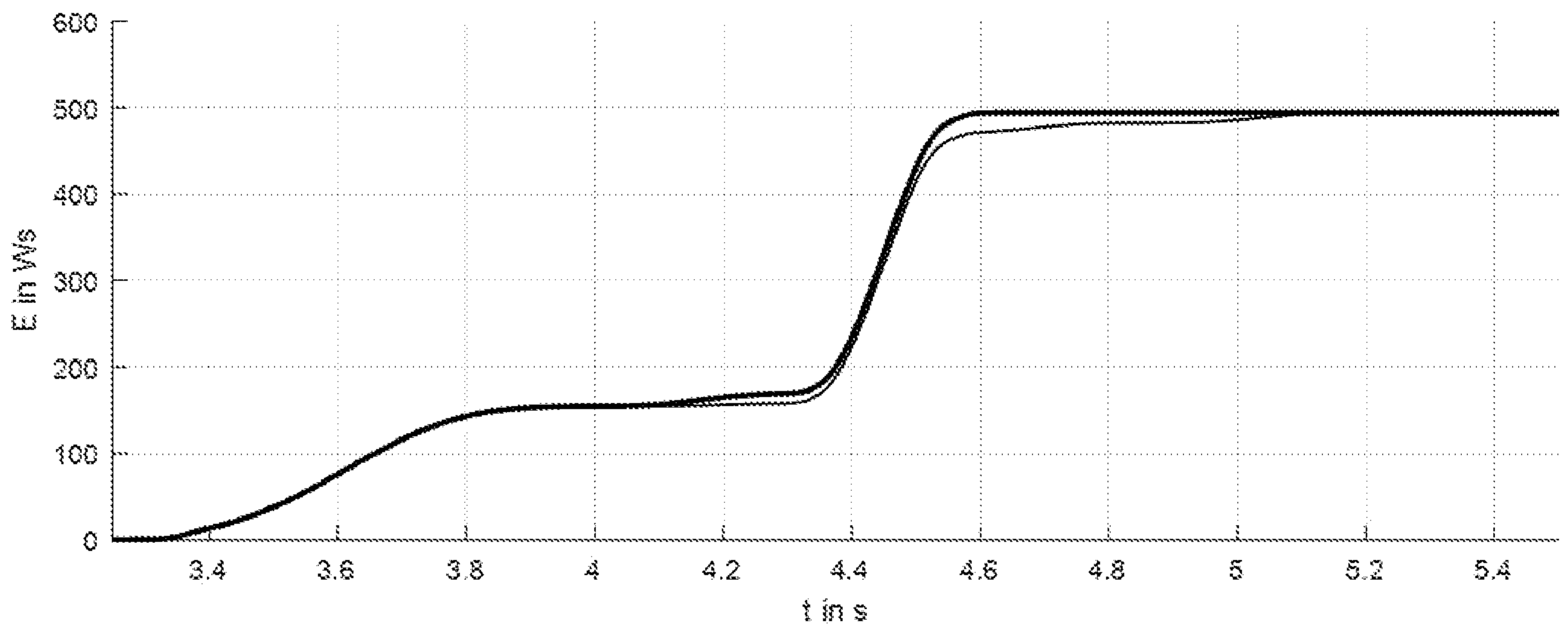
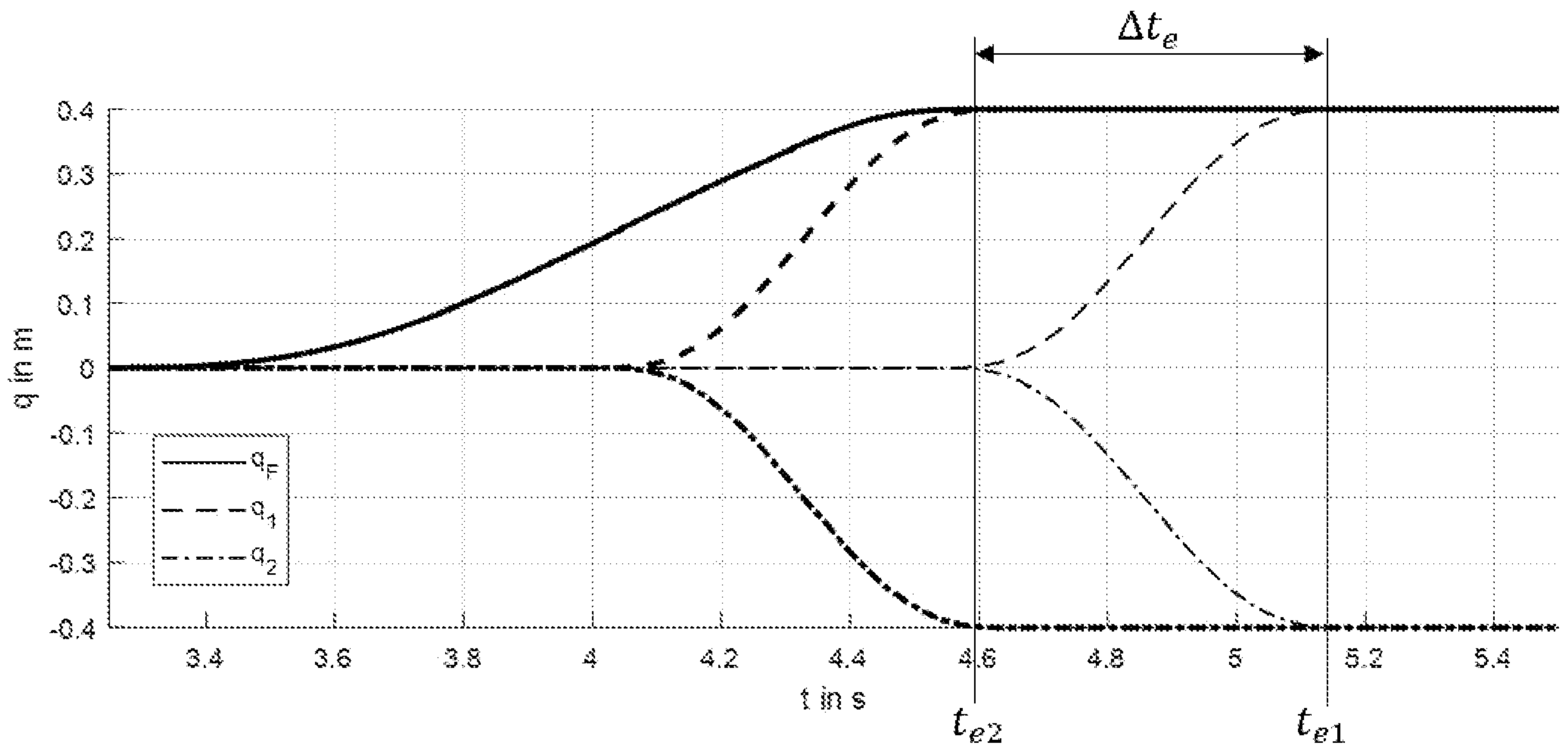
aufweisenden Bewegungsablaufs zumindest einer ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bei Vorliegen des jeweils anderen Bewegungsablaufs, gekennzeichnet durch zumindest folgende Schritte:

- Bereitstellung einer Trajektorie in Bezug auf den jeweils anderen Bewegungsablauf
 - Definition von wenigstens einer - vorzugsweise geometrischen und/oder kinematischen und/oder dynamischen - Restriktion hinsichtlich des Bewegungsablaufs der Manipulationsvorrichtung und/oder des Bewegungsablaufs der zumindest einen ausgewählten Komponente einer Formgebungsmaschine
 - Bereitstellen zumindest eines Gütefunktional, wobei sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional nur auf einen der Bewegungsabläufe bezieht und das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch eine sich auf das Gesamtsystem beziehende Restriktion repräsentiert ist oder sich das bereitgestellte zumindest eine Gütefunktional auf das Gesamtsystem bestehend aus der Manipulationsvorrichtung und der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine bezieht
 - Berechnung der sich ergebenden Trajektorie für den Bewegungsablauf der Manipulationsvorrichtung oder den Bewegungsablauf der zumindest einen ausgewählten Komponente der Formgebungsmaschine durch Extremalisierung des zumindest einen Gütefunktional unter Berücksichtigung der wenigstens einen Restriktion.
3. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei als Restriktion eine Störkontur und/oder wenigstens eine Position, die zu einer bestimmten Zeit erreicht sein muss, bereitgestellt wird.
 4. Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, wobei sich das Gütefunktional auf eine gesamte Zykluszeit der Formgebungsmaschine oder eine Teilzeit der gesamten Zykluszeit der Formgebungsmaschine bezieht.
 5. Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, wobei sich das Gütefunktional bezieht auf:

- den Energiebedarf beider Bewegungsabläufe
 - eine Minimierung einer Verlängerung einer Entnahmezeit durch Eingriff der Manipulationsvorrichtung im Vergleich zu einer Öffnungszeit der Formgebungsmaschine ohne Eingriff der Manipulationsvorrichtung
 - Stabilität hinsichtlich Schwingungen der Manipulationsvorrichtung
 - Wärmeentwicklung in elektrischen Komponenten der Manipulationsvorrichtung und/oder der Formgebungsmaschine
6. Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, wobei ein elastisches Modell der Manipulationsvorrichtung und/oder der Formgebungsmaschine mitberechnet wird, um Schwingungen des Gesamtsystems zu reduzieren.
7. Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche, wobei für zumindest einen der Bewegungsabläufe variable Restriktionen durch einen Bediener vorgegeben werden.
8. Anordnung aus einer Formgebungsmaschine, vorzugsweise einer Kunststoff-Spritzgießmaschine, und einer Manipulationsvorrichtung, vorzugsweise eines Armes oder eines Greifers einer Handlingvorrichtung, dadurch gekennzeichnet, dass eine Steuervorrichtung der Formgebungsmaschine oder der Manipulationsvorrichtung oder eine gemeinsame Steuervorrichtung der Formgebungsmaschine und der Manipulationsvorrichtung dazu konfiguriert ist, ein Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche durchzuführen oder über eine Datenfernverbindung mit einer Steuervorrichtung zur Durchführung eines Verfahren nach wenigstens einem der vorangehenden Ansprüche in Verbindung gebracht zu werden.

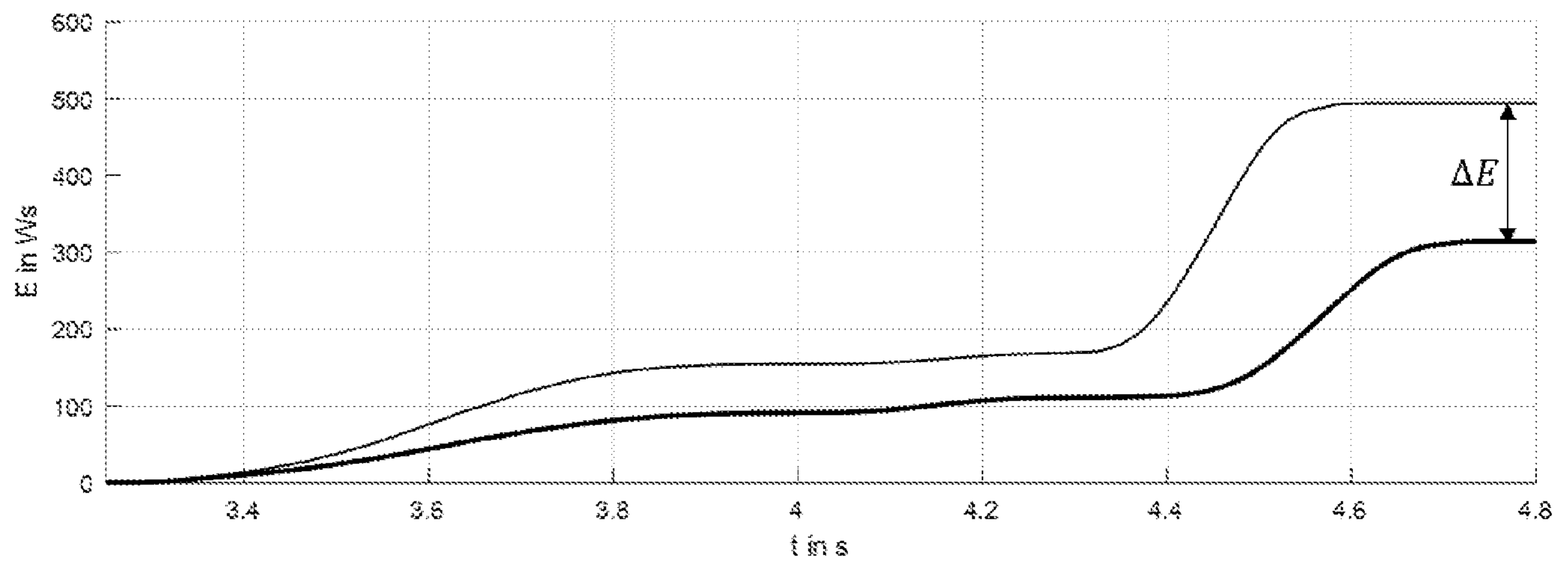
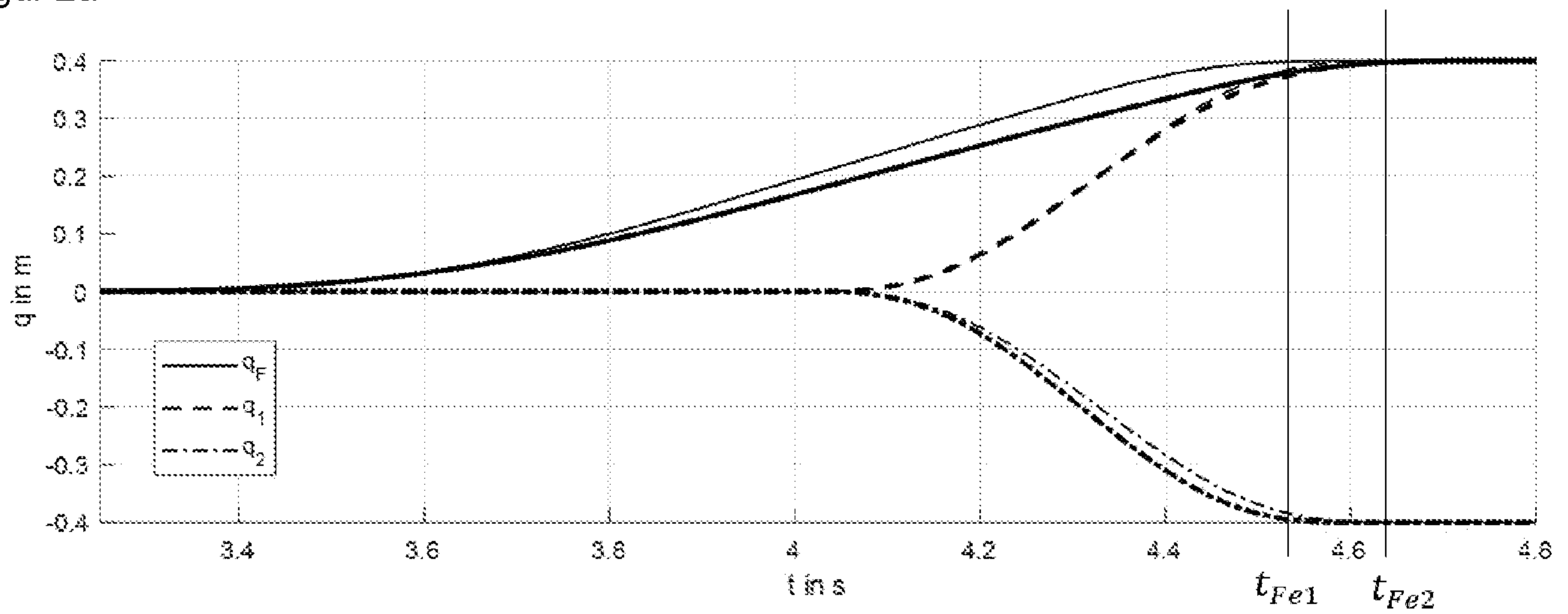
Innsbruck, am 6. Mai 2019

Figur 1a



Figur 1b

Figur 2a



Figur 2b