Entwicklung asynchroner prädiktiver Regelungsverfahren für digital vernetzte Systeme

[1]P. Varutti [2]J. Pannek [3]C. Böhm

[1]Universität Magdeburg

[2]Universität Bayreuth

[3]Universität Stuttgart

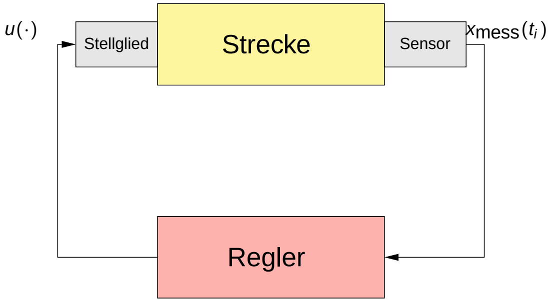
1. Workshop des DFG–Schwerpunktprogramms 1305
19.02.2008, Ruhr–Universität Bochum

Gliederung

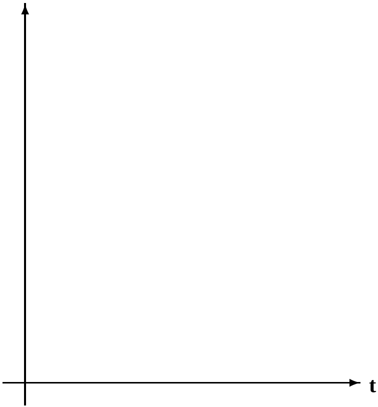
Gliederung

Gliederung

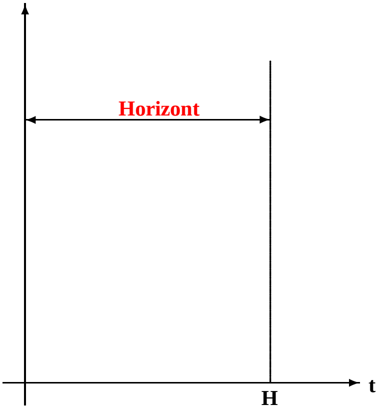
Standard–Problem



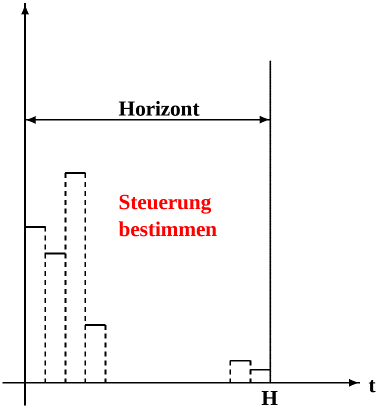
Grundidee prädiktive Regelung



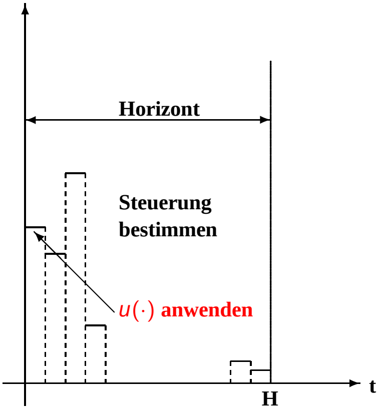
Grundidee prädiktive Regelung



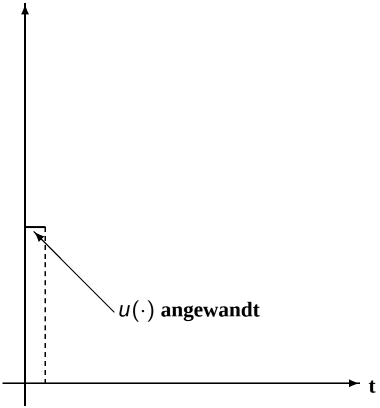
Grundidee prädiktive Regelung



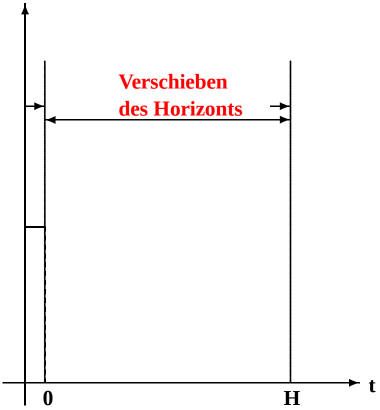
Grundidee prädiktive Regelung



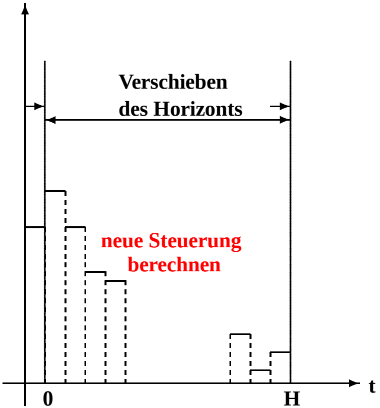
Grundidee prädiktive Regelung



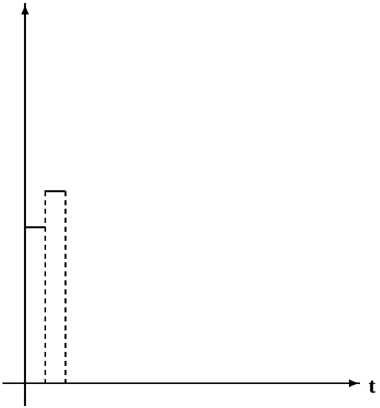
Grundidee prädiktive Regelung



Grundidee prädiktive Regelung

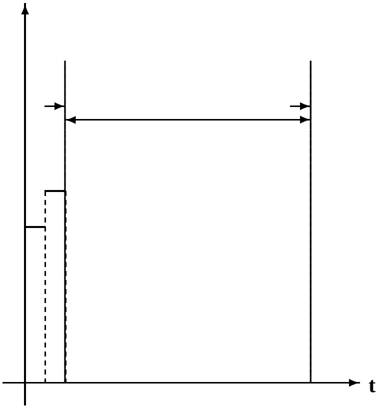


Grundidee prädiktive Regelung



Grundschema:

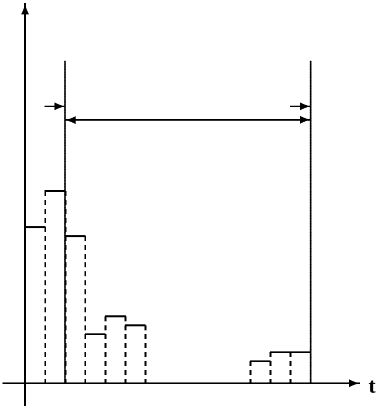
Grundidee prädiktive Regelung



Grundschema:

1. Verschieben des Horizonts

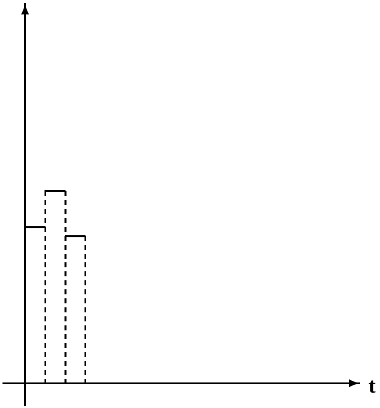
Grundidee prädiktive Regelung



Grundschema:

1. Verschieben des Horizonts
2. Berechnung der Steuerung auf Horizont

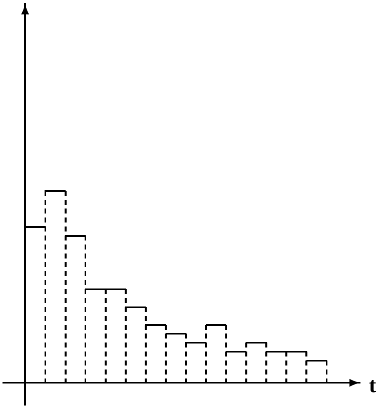
Grundidee prädiktive Regelung



Grundschema:

1. Verschieben des Horizonts
2. Berechnung der Steuerung auf Horizont
3. $u(\cdot)$ implementieren

Grundidee prädiktive Regelung



Grundschema:

1. Verschieben des Horizonts
2. Berechnung der Steuerung auf Horizont
3. $u(\cdot)$ implementieren

$\longrightarrow$ diskretes Feedback

Problemstellung in jedem Schritt

Zielfunktion

$$\inf_{u(\cdot)} J(x, u(\cdot)) = \int_0^{t_N} l(x(t), u(t))dt + F(x(t_N))$$

Dynamik

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \qquad x(0) = x_{\text{mess}}(t_i)$$

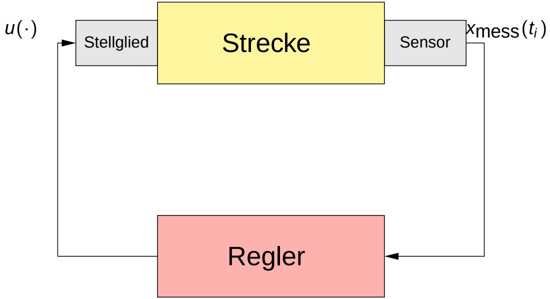
Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} u(t) &\in \mathcal{U} \\ S(x(t), u(t)) &\leq 0 \end{aligned}$$

Prädiktive Regelung ohne Netzwerk

Messung

$x_{\text{mess}}(t_i)$ – gemessener Zustand



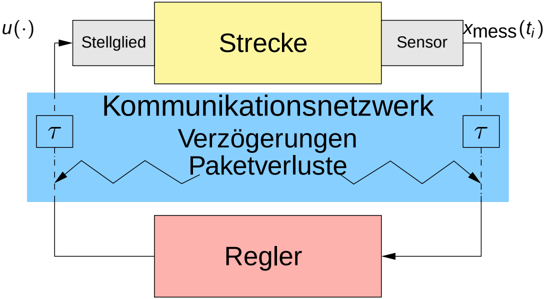
Stellgröße

$u(\cdot)$ – Steuerfunktion

Erweiterung auf asynchrone prädiktive Regelung

Messung

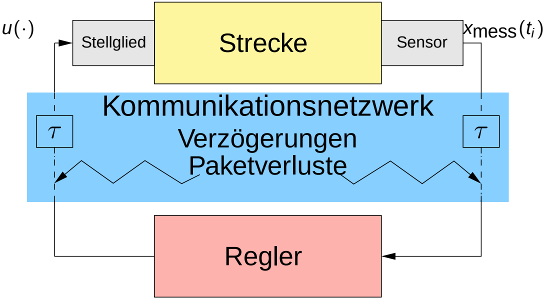
$x_{\text{mess}}(t_i)$ – gemessener Zustand



Stellgröße

$u(\cdot)$ – Steuerfunktion

Annahmen an Regelkreis und Kommunikation



Annahmen

1. Synchronisierte Uhren in Sensor, Regler und Stellglied
2. Paketbasierte Kommunikation mit Zeitstempeln
3. Abtastzeitpunkte t_i
4. Begrenzte maximal zulässigen Netzwerkverzögerung
5. Klare Definition von Paketverlusten

Ziele

1. Untersuchung von Stabilitäts- und Robustheitseigenschaften bei Verzögerungen und Paketausfällen
2. (Robuster) Reglerentwurf unter direkter Einbeziehung variabler Verzögerungen und Paketausfällen
3. Reglerentwurf, der den Informationsfluss minimiert
4. Effiziente Implementierung

Programm Bayreuth

Jürgen Pannek

Betrachtungsweise

Diskrete Dynamik, i = Kommunikationspunkt

$$x(i+1) = f(x(i), u(i)), \quad x(0) = x_{\text{mess}}(i)$$

Zielfunktion

$$\min_{u \in \mathcal{U}} J_N(x, u) = \sum_{i=0}^{N-1} L(x(i), u(i))$$

Nebenbedingungen

$$u(i) \in \mathbb{U}, \quad S(x(i), u(i)) \leq 0$$

Wertefunktion

$$V_N(x) = \min_{u \in \mathcal{U}} J_N(x, u)$$

Stabilitätsgarantie - Ausgangspunkt

Ziel: Stabilitätsgarantie für den Regelkreis

- Berücksichtigung von Verzögerungen / Paketausfällen
- rein optimierungsbasiert

Jadbabaie & Hauser '05, Grimm et al. '05

Unter geeigneten Annahmen stabilisiert MPC das System für hinreichend großen Optimierungshorizont N.

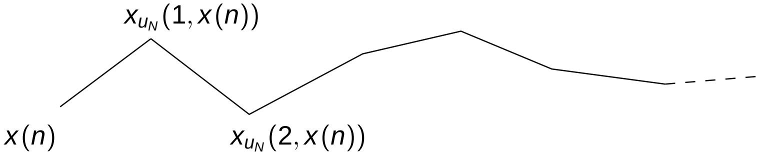
Voraussetzung: Exponentielle Kontrollierbarkeit von L:

$\exists C > 0$, $\sigma \in (0,1)$: $\forall x \in X$ $\exists u \in U$:

$$L(x(n), u(n)) \leq C\sigma^n \min_{u \in U} L(x(0), u)$$

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung



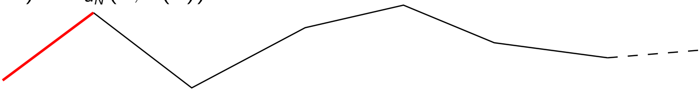
Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

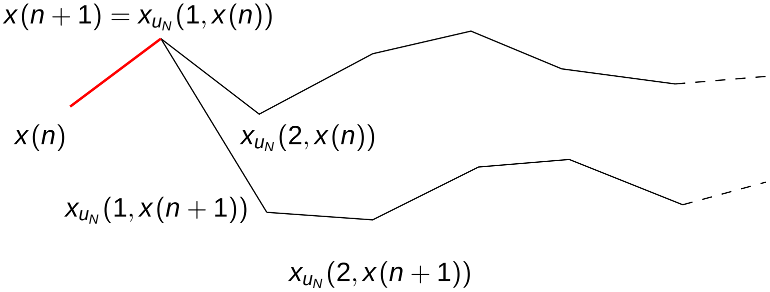
$$x(n+1) = x_{u_N}(1, x(n))$$



Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis
$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

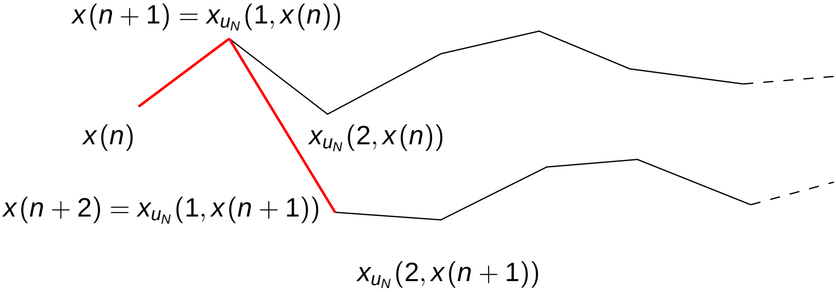


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

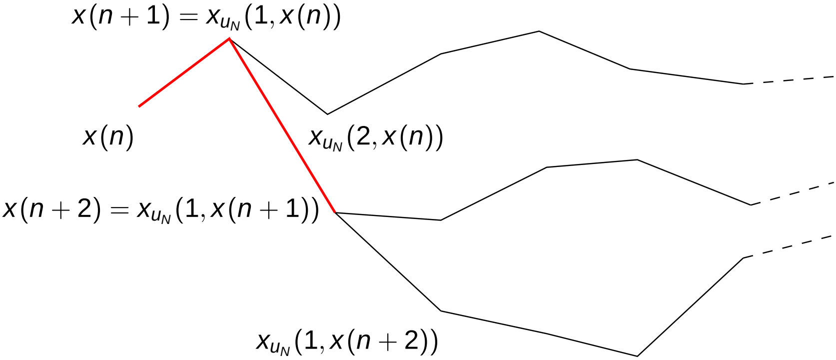


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

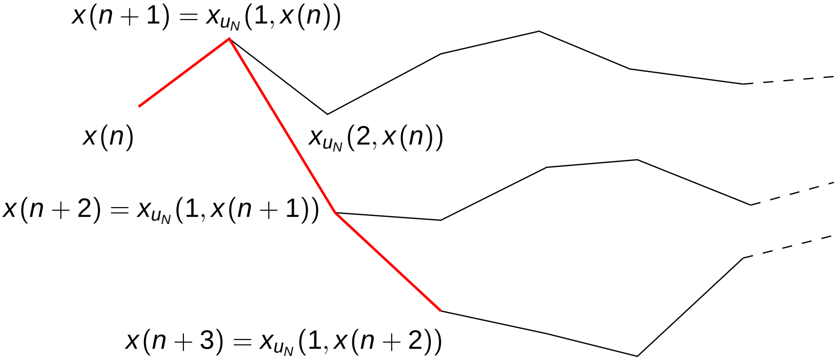


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

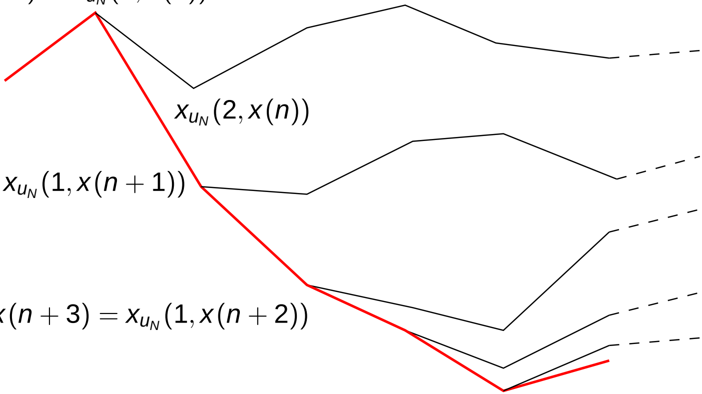


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf ohne Verzögerung

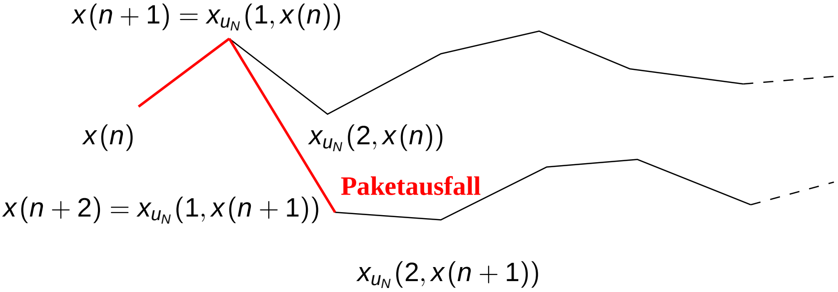


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf mit Verzögerung

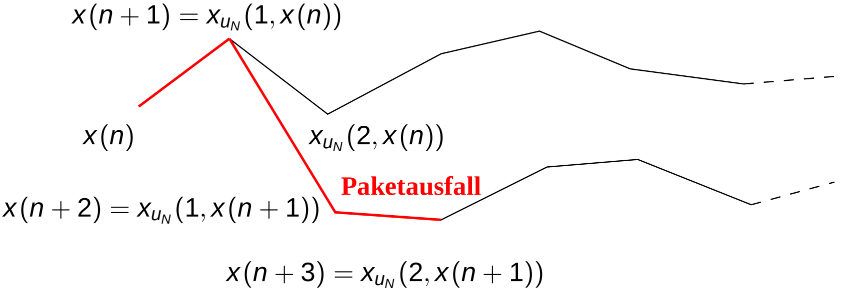


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf mit Verzögerung

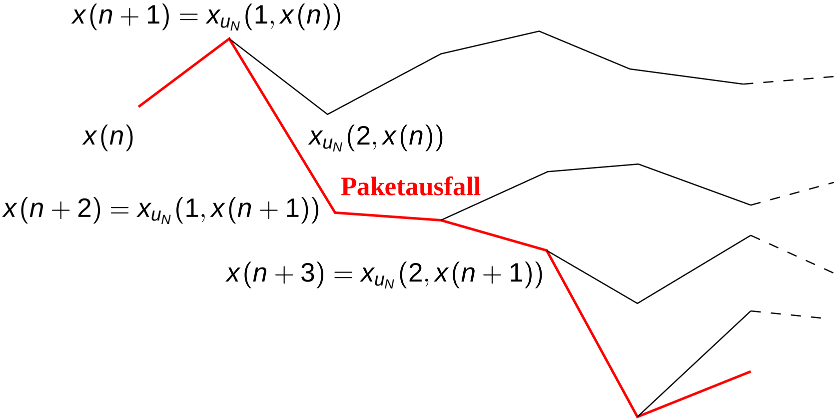


Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Ansatzpunkt

Verlauf mit Verzögerung



Notation: $x(\cdot)$ – Trajektorie geschlossener Kreis

$x_{u_N}(\cdot, x(n))$ – Lösung auf endlichem Horizont

Stabilitätsgarantie

Grüne, Rantzer (TAC – 08)

Wenn $\alpha \in (0, 1]$ existiert, so dass die "relaxierte" Lyapunov Ungleichung

$$V_N(f(x, \mu_N(x))) \leq V_N(x) - \alpha L(x, \mu_N(x))$$

für alle $x \in X$ erfüllt ist, so folgt asymptotische Stabilität (mit V_N als Lyapunov Funktion). Zudem gilt die Suboptimalitätsabschätzung

$$\alpha J_\infty(x, \mu_N) \leq V_\infty(x).$$

Ziele

Nächste Schritte

1. Verallgemeinerung der Stabilitätsaussage auf Ausfälle

   $\longrightarrow$ Dauer beschränkt / stochastisch

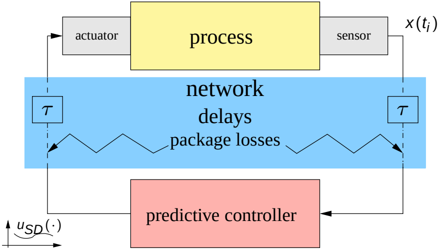
2. Untersuchung der Abhängigkeit α von Ausfalldauer
3. Implementierung der Algorithmen
4. Erprobung an realen Systemen (Stuttgart / Magdeburg)

Programm Stuttgart-Magdeburg

Arbeitspaket I

Paolo Varutti

Compensation of Delays and Package Losses



Motivation

- **delays** and
- **package losses**

are unavoidable and might lead to

- **instability**
- **loss of performance**

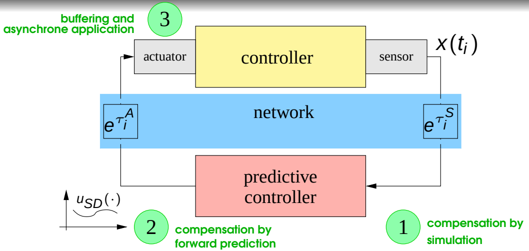
Objective

Design of **predictive control strategies** that **guarantee stability** and **performance** taking explicitely into account

- **communication delays**
- **package losses**
- **uncertainty**

Buffering and Compensation: Idea

simplified case:
no package losses

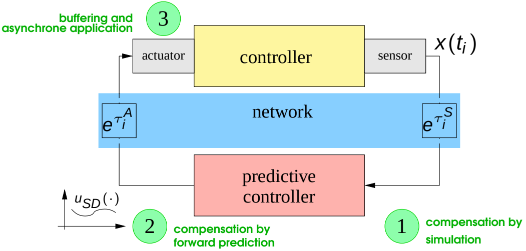


Compensation by prediction in controller & buffering in actuator

1. Compensation of measurement delay by forward prediction
2. Controller solves problem for (worst case) delay
3. Actuator only applies input once the time stamps match (buffering + synchronization)

Stability?

Buffering and Compensation: First Results



Theorem

The closed loop is stable in the sense of asymptotic convergence if the **nominal controller (subject to no delays)** *stabilizes the system.*

Next Steps

Robustness analysis and robust design

1. Development of a **suitable stability notion** (with Bayreuth)
2. **Examination of the inherent robustness properties**:
   - Maximum delays?
   - Maximum tolerate able uncertainties?
3. **Robust controller design**

Consideration of package losses

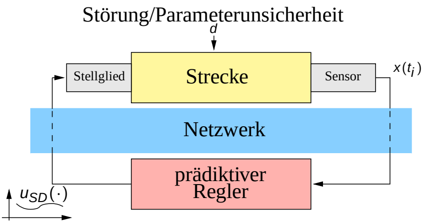
- Challenge: compensation approach conservative
- Idea:
  - Use **prediction consistent control schemes**
  - If package is lost, continue applying old input
- Stability?

Programm Stuttgart-Magdeburg

Arbeitspaket II

Christoph Böhm

Reduktion des Datenaustauschs



Motivation

- begrenzte Sendeleistung der Sensoren (z.B. Batteriebetrieb)
- begrenzte Kapazität des Netzwerks

Ziel

Entwicklung von prädiktiven Regelungsmethoden mit

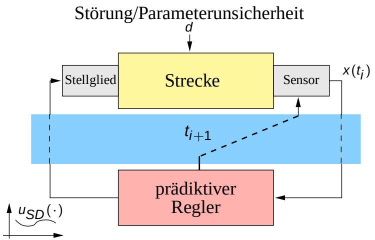
- garantierten **Stabilitätsaussagen** ggü. Störungen und Parameterunsicherheiten
- guten **Performance**-Eigenschaften

so dass **Datenaustausch**
zwischen Regler und Sensor **minimal**

Ansätze

Grundidee

- Variable, nicht fest vorgegebene Abtastzeit
- Datenübertragung von Regler an Sensor
- Regler „bestimmt“ nächsten Abtastzeitpunkt t_{i+1}



Verfolgte Ansätze

- Direkte Optimierung der Abtastzeitpunkte
- Sensor verwendet vorhergesagtes Verhalten

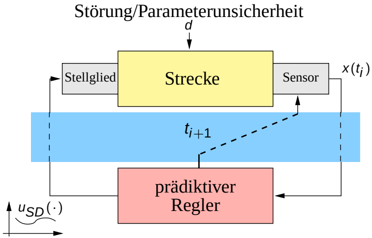
Direkte Optimierung der Abtastzeitpunkte

Grundidee

Regler berechnet maximales t_{i+1} unter Berücksichtigung von Störungen, Unsicherheiten

Ansatz:

- t_{i+1} ist Optimierungsvariable
- Formulierung als robustes Regelungsproblem
- Übertragung von t_{i+1} an den Sensor



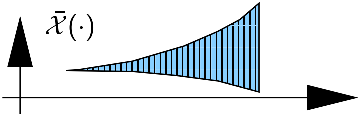
Sensor verwendet vorhergesagtes Streckenverhalten

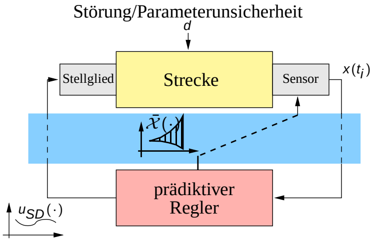
Grundidee

Sensor entscheidet, wann neue Informationen gesendet werden müssen

Ansatz:

- Vorhersage des Streckenverhaltens unter Störungen und Unsicherheiten $\longrightarrow$ Verhaltensschlauch
- Neues Sensorsignal, wenn System Rand des Schlauches überschreitet





Zusammenfassung

Projekt ASYPRED

Entwicklung asynchroner prädiktiver Regelungsverfahren für digital vernetzte Systeme

Zusammenfassung

Bayreuth

Ausnutzung der prädiktiven Regelung inhärenten Strukturen zur garantierten Stabilisierung bei Paketverlusten und Verzögerungen

Stuttgart-Magdeburg

Entwicklung strukturierter prädiktiver Regelungsverfahren mit garantierten Stabilitätsaussagen mit

1. Kompensation von Verzögerungen und Paketverlusten
2. minimalem Datenaustausch zwischen Sensor und Regler