

Evolutionäre Algorithmen: Fallstudien

Karsten Weicker

HTWK Leipzig

11. November 2007

Überblick

- 1 Motorenkalibrierung
- 2 Antennenplatzierung
- 3 Stundenplanoptimierung

Überblick

- 1 **Motorenkalibrierung**
- 2 Antennenplatzierung
- 3 Stundenplanoptimierung

Motorenkalibrierung

Kooperation

- Prof. Andreas Zell (Universität Tübingen)
- Thomas Fleischhauer, Dr. Alexander Mitterer und Dr. Frank Zuber-Goos (BMW AG)

Veröffentlichungen

- „Einsatz von Softcomputing-Techniken zur Kennfeldoptimierung elektronischer Motorsteuergeräte“, Karsten Weicker, Alexander Mitterer, Thomas Fleischhauer, Frank Zuber-Goos, Andreas Zell. In: at - Automatisierungstechnik, 48(11), pp. 529-538, 2000.

Motorenkalibrierung

Lerneffekt

- Umsetzung für zeitaufwändige Bewertung und unscharfe Gütwerte
- Berücksichtigung vorab nicht bekannter technischer Randbedingungen
- Verknüpfung verschiedener Verfahren zur Lösung der Aufgabe
- geschicktes Einpassen eines Standardalgorithmus in einen Prozess als Anpassung an ein Problem

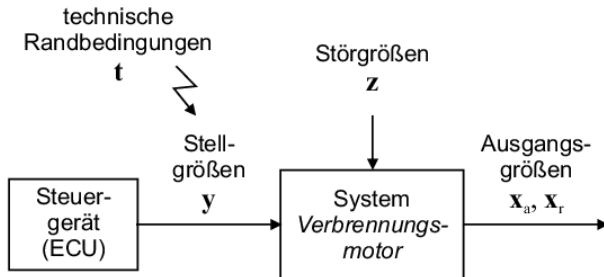
Motorenkalibrierung

Aufgabenstellung

- Motorsteuergeräte: Kennfelder bestimmen technische Stellgrößen aus Betriebsbedingungen
- Betriebsbedingungen:
 - Motordrehzahl (Gaspedal)
 - relative Luftmasse (Lufttemperatur und -druck)
- Stellgrößen:
 - Zündwinkel
 - Ein- und Auslassspreizungen
- beobachtbare Kenngrößen:
 - Motorenleistung
 - Kraftstoffverbrauch
 - Schadstoffemission

Motorenkalibrierung

Aufgabenstellung



Motorenkalibrierung

Annahme

- System hängt nicht von einem inneren Zustand ab
- typisch für Situation am Prüfstand

Formale Beschreibung

- Stellgrößen $y \in \mathbb{R}^{n_y}$
- Störgrößen $z \in \mathbb{R}^{n_z}$, z. B. Umgebungsbedingungen wie Luftfeuchtigkeit, -temperatur, -druck und Kraftstofftemperatur
- direkte Zielgrößen $x_a \in \mathbb{R}^{n_a}$ und Randbedingungen $x_r \in \mathbb{R}^{n_r}$ (z.B. unkontrollierte Verbrennung = Klopfen)

Motorenkalibrierung

Formalisierung

- Suchraum: $\Omega = \mathbb{R}^{n_y+n_z}$
- System unterliegt „unbekannten“ Funktionen

$$x_a = f(y, z) \quad \text{mit} \quad f : \mathbb{R}^{n_y+n_z} \rightarrow \mathbb{R}^{n_a}$$

$$x_r = g(y, z) \quad \text{mit} \quad g : \mathbb{R}^{n_y+n_z} \rightarrow \mathbb{R}^{n_r}$$

Motorenkalibrierung

Randbedingungen

- feste Beschränkungen bezüglich des Suchraums \mathbb{R}^{n_y} . n_t Bedingungen in

$$t(y) \leq 0$$

- Randbedingungen aus der Systemreaktion

$$x_r = g(y, z) \leq 0$$

Motorenkalibrierung

Ziel der Optimierung

- Störgrößen z werden als konstanter Vektor z' angenommen
- Menge der legalen Individuen

$$\Omega_{legal} = \{y \in \Omega \mid g(y, z') \leq \mathbf{0} \text{ und } t(y) \leq \mathbf{0}\}$$

- gesucht: Pareto-optimales $y^* \in \mathbb{R}^{n_y}$, welches die Randbedingungen erfüllt
- Messfehler bleiben unberücksichtigt

Motorenkalibrierung

Ziel der Optimierung

- ein Stellgrößenvektor y^* beschreibt Einstellungen für einen Betriebspunkt (Drehzahl, spez. Luftmasse)
- Stellgrößenvektoren sind für ein komplettes Raster an Betriebspunkten notwendig und im Kennfeld abzulegen

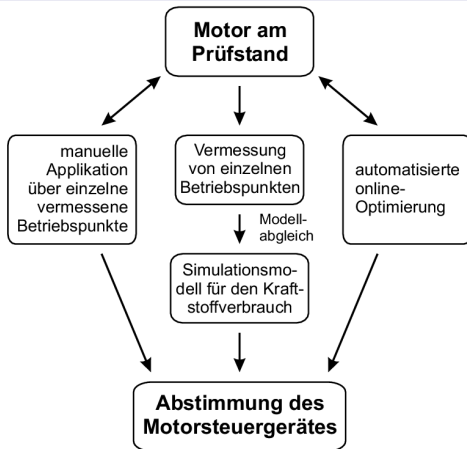
Motorenkalibrierung

Notwendigkeit der Automatisierung

- konventionell: manuelle Optimierung der Kennfelder am Prüfstand
- Anzahl der Stellgrößen bei modernen Motoren:
 $n_y > 5$
- exponentiell wachsender Applikationsaufwand nicht mehr durchführbar

Motorenkalibrierung

Optimierungsansätze



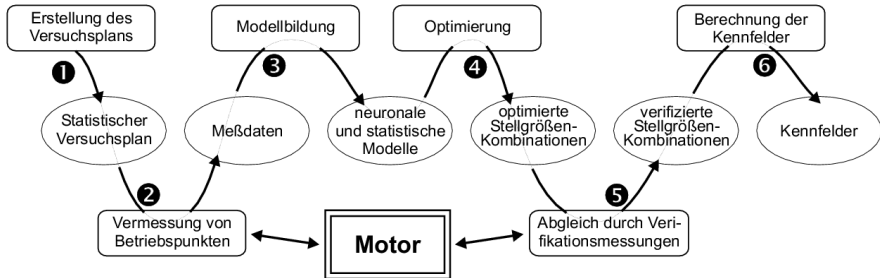
Motorenkalibrierung

Optimierungsansätze

- Simulationsmodelle
 - Beispiel: PROMO
 - beruht auf physikalischen Gleichungen
 - keine Schadstoffemissionen
 - schlechte Anpassung an modernere Motoren
- automatisierte Online-Optimierung
 - Beispiele: CAMEO, VEGA
 - Restriktionen hinsichtlich Stellgrößenzahl
 - zu simples zugrundeliegendes Modell
 - mangelhafte Anpassung an spezifische Firmenprozesse

Motorenkalibrierung

Ablauf des Optimierungsprozesses



Motorenkalibrierung

Grundkonzept

- zweistufiger Ansatz
- zunächst: Modellierung des Motorverhaltens
- dann: Optimierung mit der Evolutionsstrategie
- Grund: kostspielige und verrauschte Bewertungsfunktion

Motorenkalibrierung

Schritte im Einzelnen

- 1 statistischen Versuchsplan erstellen: möglichst wenig Messungen
- 2 Motor auf dem Prüfstand vermessen
- 3 Modellierung des Systemverhaltens
- 4 Optimierung auf den Modellen
- 5 Verifikation der Ergebnisse am Motorprüfstand
- 6 Erstellung der Kennfelder aus den Optima-Kandidaten

Motorenkalibrierung

Modellierung

- Vorverarbeitung der Daten
 - Eingangsdaten um 0 zentrieren und mit Standardabweichung skalieren
 - Ausgangsdaten auf $[-0,9, 0,9]$ skalieren
- Modell: neuronale Netze bzw. multivariate Regression an Polynommodellen
- konkurrierende Modellierung zur Kompensation von Modellungenauigkeiten
- Lernverfahren: *Resilient Propagation*, *Scaled Conjugate Gradient*, Levenberg-Marquardt
- Übertraining durch Kreuzvalidierung vermeiden

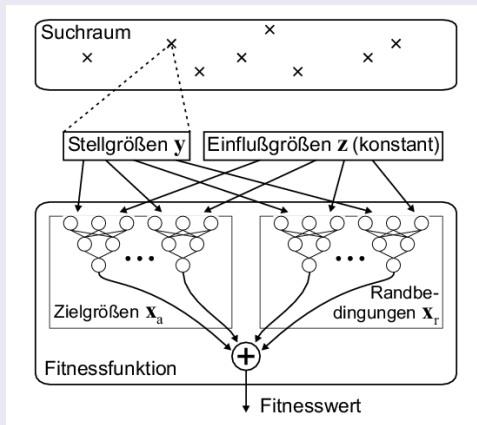
Motorenkalibrierung

Optimierung

- Evolutionsstrategie mit separater Schrittweitanpassung, Sequential Quadratic Programming
- Randbedingungen gehen als Strafterme ein
- meist: (10, 50)-Evolutionsstrategie

Motorenkalibrierung

Optimierung



Motorenkalibrierung

Phase 1: Versuchsplan

- Drehzahl: 1500–5000 U/min
- relativen Luftmasse: 20–70 %
- Ventilsteuerzeiten: in einem $\pm 10^\circ$ Kurbelwinkel-Band um den Referenzwert
- Verstellbereich für den Zündzeitpunkt ergibt sich aus:
 - unteren Grenze „maximale Abgastemperatur“
 - oberen Grenze „Klopfen“

geht nicht in den Versuchsplan ein (da vorab nicht bekannt)

- Versuchsplan: 35 Punkte

Motorenkalibrierung

Phase 2: Messungen

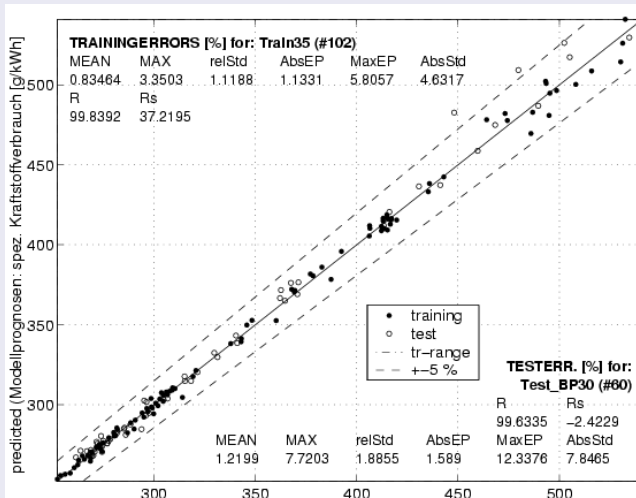
- Versuchsplan abarbeiten
- 3 verschiedene Zündzeitpunkte pro Betriebspunkt
- $3 \cdot 35 = 105$ Einzelmessungen
- zusätzlich: 30 weitere Betriebspunkte für die Beurteilung der Generalisierungsfähigkeit in der Modellbildung

Phase 3: Modellbildung

- Training der Modelle mit den 105 Punkten
- hohe Modellgüte: mittlerer relativer Fehler von 1.2%

Motorenkalibrierung

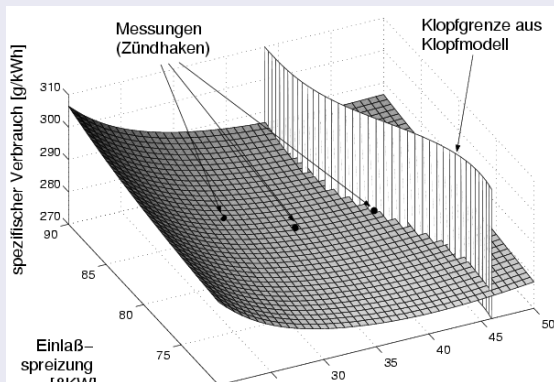
Modellgüte



Motorenkalibrierung

Randbedingung

- Klopfgrenze und Abgastemperatur werden ebenfalls modelliert



Motorenkalibrierung

Phase 4: Modellbasierte Optimierung

- Optimierung der Stellgrößen für 30 Betriebspunkte
- drei konkurrierende Modelle als Grundlage

Phase 5: Verifikationsmessungen

- $3 \cdot 30 = 90$ Sollwertvorgaben werden am Prüfstand abgeglichen

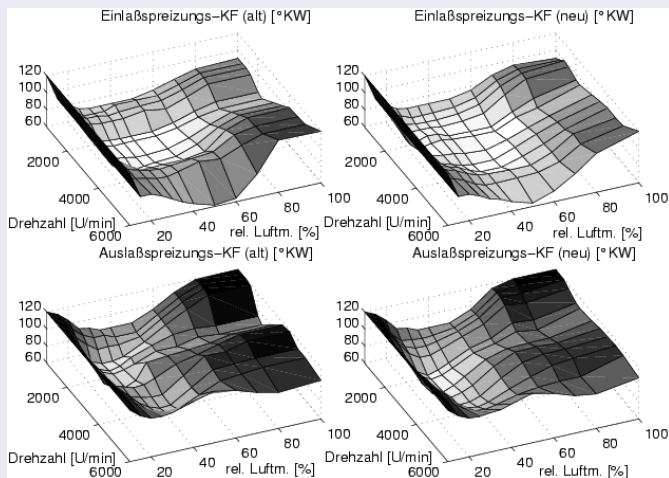
Motorenkalibrierung

Phase 6: Kennfeldberechnung

- pro Betriebspunkt: 3 Verifikationsmessungen und Referenzwert
- bei mechanischen Stellgrößen: hohe Gradienten vermeiden
⇒ dann werden suboptimale Punkte bevorzugt
- mittlere Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um 2.8%

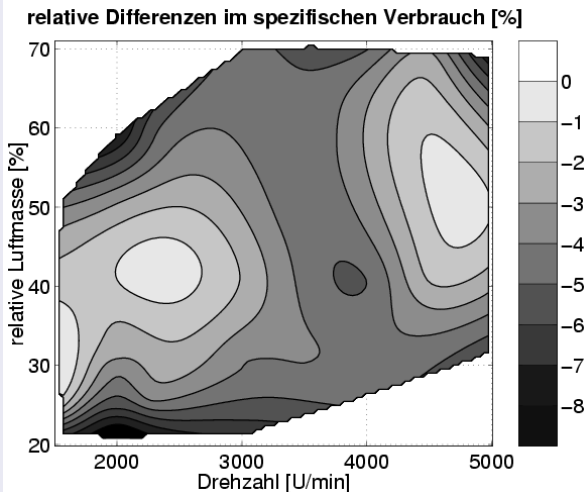
Motorenkalibrierung

Kennfelder



Motorenkalibrierung

Kraftstoffeinsparung



Motorenkalibrierung

Ergebnis

- die Vorgehensweise ist effizient
- die Qualität der Ergebnisse ist hoch
- zum Vergleich:
 - Vollrasterung als „konventionelle Strategie“
 - zwei Drittel der Messungen werden eingespart
 - pro Messung (mit Zündzeitpunkt-Optimierung):
durchschnittlich ca. 10 Minuten effektive Prüfstandszeit

Überblick

- 1 Motorenkalibrierung
- 2 **Antennenplatzierung**
- 3 Stundenplanoptimierung

Antennenplatzierung

Kooperation

- Nicole Weicker (Universität Stuttgart)
- Gabor Szabo, Prof. Peter Widmayer (ETH Zürich)

Veröffentlichungen

- „Evolutionary Multiobjective Optimization for Base Station Transmitter Placement with Frequency Assignment“, Nicole Weicker, Gabor Szabo, Karsten Weicker, Peter Widmayer. In: IEEE Trans. on Evolutionary Computing, 7(2), pp. 189-203, 2003.

Antennenplatzierung

Lerneffekt

- Eingang der Problemaspekte in Bewertungsfunktion und Randbedingungen
- Zuschnitt der Operatoren auf das Problem
- Kriterien für die Zusammenstellung der Operatoren
- Einsatz einer Reparaturfunktion für Randbedingungen
- neuer Selektionsmechanismus aufgrund von Effizienzüberlegungen
- Vergleichskriterium für Mehrzielproblem

Antennenplatzierung

Aufgabenstellung

- Basisantennen für Mobilfunknetze
- Erstes Ziel: hohe Netzverfügbarkeit
- Zweites Ziel: geringe Kosten
- übliche Vorgehensweise:
 - 1 Basisantennen platzieren und Größe/Reichweite konfigurieren
⇒ Bedarf abdecken
 - 2 Frequenzen zuweisen
⇒ Interenzen minimal halten

Antennenplatzierung

Ausgangssituation

- beide Probleme sind NP-hart
- Platzierung kann Frequenzzuweisung stark einschränken
- in einer Iteration können die Ergebnisse der Frequenzzuweisung nur bedingt in die Platzierung wieder einfließen

Grundsatzentscheidung

- beide Probleme werden gleichzeitig bearbeitet

Antennenplatzierung

Formalisierung

- rechteckiges Gebiet: (x_{\min}, y_{\min}) und (x_{\max}, y_{\max}) mit Rasterung res
- Menge aller Positionen:

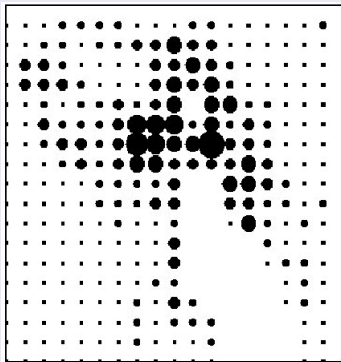
$$Pos = \left\{ (x_{\min} + i \cdot res, y_{\min} + j \cdot res) \mid 0 \leq i \leq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{res} \text{ und } 0 \leq j \leq \frac{y_{\max} - y_{\min}}{res} \right\}$$

(mögliche Positionen für Basisantennen)

Antennenplatzierung

Gesprächsbedarf Zürich

- statistisch ermitteltes Gesprächsaufkommen
 $\text{bedarf}(\text{zelle}) \in \mathbb{N}$ für einige $\text{zelle} \in \text{Pos}$



Antennenplatzierung

Formalisierung: Antenne

- Antenne $t = (pow, cap, pos, frq)$
- Sende-/Empfangsstärke
 $pow \in [MinPow, MaxPow] \subset \mathbb{N}$
- Gesprächskapazität $cap \in [0, MaxCap] \subset \mathbb{N}$
- Frequenzen/Kanäle $frq \subset Frequ = \{f_1, \dots, f_k\}$ mit
 $|frq| \leq cap$
- alle möglichen Antennenkonfigurationen:

$$T = [MinPow, MaxPow] \times [0, MaxCap] \times Pos \times Frequ.$$

Antennenplatzierung

Genotyp

- problemnaher Genotyp

$$\Omega = \mathcal{G} = \left\{ \{t_1, \dots, t_k\} \mid k \in \mathbb{N} \text{ und } \forall 1 \leq i \leq k : t_i \in T \right\}.$$

- variable Länge

Antennenplatzierung

Randbedingung

- Netzverfügbarkeit hat oberste Priorität
⇒ wird als harte Randbedingung formuliert

- erreichbare Positionen gemäß

Wellenverbreitungsmodell:

$$wp : Pos \times [MinPow, MaxPow] \rightarrow \mathcal{P}(Pos)$$

Antennenplatzierung

Randbedingung (Forts.)

- $A.G = (t_1, \dots, t_k)$ heißt legal, wenn für jedes t_i eine Zuordnung $bedient(t_i, zelle) \in \mathbb{N}$ (mit $zelle \in Pos$) existiert, sodass
 - $bedient(t_i, zelle) > 0 \Rightarrow zelle \in wp(t_i),$
 - $\sum_{i \in \{1, \dots, k\}} bedient(t_i, zelle) \geq bedarf(zelle)$ und
 - $\sum_{zelle \in Pos} bedient(t_i, pos) \leq cap$ mit $t_i = (pow, cap, pos, freq)$

Antennenplatzierung

Bewertungsfunktionen

- Störungen durch Antennen mit gleichen oder eng beieinander liegende Frequenzen in einer Zelle

$$f_{\text{interferenz}}(A) = \frac{\sum_{i \in \{1, \dots, k\}} \# \text{gestörteGespräche}(t_i)}{\sum_{\text{zelle} \in \text{Pos}} \text{bedarf}(\text{zelle})}.$$

- Kosten $\text{kosten}(\text{pow}_i, \text{cap}_i)$ pro Antenne

$$f_{\text{kosten}}(A) = \sum_{i \in \{1, \dots, k\}} \text{kosten}(t_i).$$

Antennenplatzierung

„Entwurfsmuster“

- nur legale Individuen, daher: Reparaturfunktion notwendig
- jede Antennenkonfiguration muss noch erreichbar sein
- verlängernde und verkürzende Operatoren halten sich die Waage
- Feinabstimmung und Erforschung sind ausgeglichen
⇒ problemspezifische und zufälliger Operatoren

Antennenplatzierung

Reparaturfunktion

- die Zellen in einer zufälligen Reihenfolge besuchen
- falls ihr Bedarf nicht gedeckt ist:
 - 1 bei Existenz mindestens einer Antennen mit freier Kapazität:
die stärkste Antenne wählen und Frequenzen zuweisen
 - 2 ggf. diejenige Antenne ermitteln, die kostenminimal durch Erhöhung der Stärke den Bedarf decken kann
 - 3 ggf. prüfen welche Kosten durch eine neue Antenne unmittelbar bei der Zelle entstehen
 - 4 ggf. Lösung (2) oder (3) umsetzen

Antennenplatzierung

Reparaturfunktion: Einsatz

- auf jedes neu erzeugte Individuum
- zur Initialisierung der Anfangspopulation
 - Reparaturfunktion auf ein leeres Individuum
 - max. $2^{|Pos|}$ Individuen durch die möglichen zufälligen Reihenfolgen der Bedarfszellen

Mutationsoperatoren

- 6 „gerichtete“ Mutationen, die einer speziellen Idee folgen
- 5 „zufällige“ Mutationen

Antennenplatzierung

Gerichtete Mutationsoperatoren

- DM1:* Falls eine Antenne unbenutzte Frequenzen hat
⇒ Kapazität entsprechend reduzieren
- DM2:* Falls eine Antenne maximale Kapazität nutzt
⇒ eine weitere Antenne mit
Standardeinstellungen in der Nähe platzieren
- DM3:* Falls Antennen große überlappende Regionen
haben
⇒ eine Antenne entfernen

Antennenplatzierung

Gerichtete Mutationsoperatoren

DM4: Falls Antennen große überlappende Regionen haben

⇒ Stärke einer Antenne so reduziert, dass dennoch alle Anrufe bedient werden

DM5: Falls Interferenzen vorkommen

⇒ involvierte Frequenzen verändern

DM6: Falls Antennen nur eine kleine Anzahl an Anrufen bedienen

⇒ eine solche Antenne löschen

Antennenplatzierung

Zufällige Mutationsoperatoren

- RM1*: Position einer Antenne ändern (Stärke und Kapazität unverändert, Frequenzen neu durch Reparaturfunktion)
- RM2*: komplett zufälliges Individuum (wie in der Initialisierung)
- RM3*: Stärke einer Antenne zufällig ändern
⇒ gleicht *DM4* aus

Antennenplatzierung

Zufällige Mutationsoperatoren

RM4: Kapazität einer Antenne zufällig verändern
⇒ gleicht *DM1* aus

RM5: zugeordneten Frequenzen einer Antenne verändern
⇒ gleicht *DM5* aus

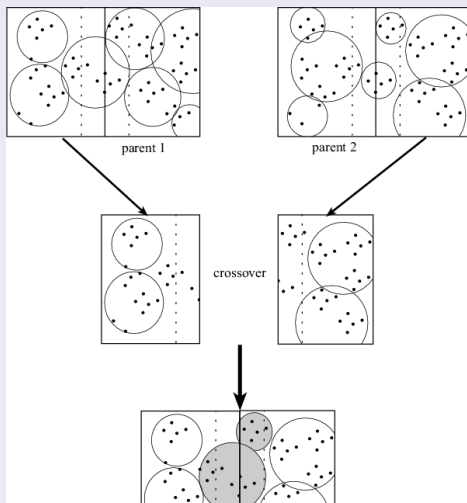
Antennenplatzierung

Rekombination

- Gesamtgebiet in zwei Hälften teilen (vertikal oder horizontal)
- pro Hälfte die Antennen eines Individuums übernehmen
- ein Korridor um die Grenze durch Reparaturalgorithmus füllen

Antennenplatzierung

Rekombination



Antennenplatzierung

Selektion

- moderne Mehrzielselektion notwendig
 - Problem bestehender Algorithmen (z.B. SPEA):
 - ein Individuum wird mit $\mathcal{O}(\tilde{\mu}^2)$ in ein Archiv der Größe $\tilde{\mu}$ integriert
 - schlecht für „steady state“ Ansatz
(Grundsatzentscheidung in der Anwendung!)
- ⇒ eine schnelle Alternative wird benötigt

Antennenplatzierung

Selektion

- Elternselektion als Turnierselektion basierend auf
 - $\text{Dominiert}(A)$ = Menge der von A dominierten Individuen in der Population
 - $\text{WirdDominiert}(A)$ = Menge der Individuen in der Population, die A dominieren

- Rang zuweisen

$$\text{Rang}(A) = \# \text{WirdDominiert}(A) \cdot \mu + \# \text{Dominiert}(A).$$

- einziges Problem: Gendrift, wenn alle Individuen gleichwertig sind

Antennenplatzierung

Selektion

- vier Fälle:
 - wird das neue Individuum übernommen?
 - welches wird ersetzt?

Fall 1: Beide Mengen sind leer
⇒ übernehmen, Individuum mit schlechtestem Rang löschen

Fall 2: $\text{Dominiert}(B)$ ist nicht leer
⇒ übernehmen, schlechtestes Individuum aus $\text{Dominiert}(B)$ löschen

Antennenplatzierung

Selektion

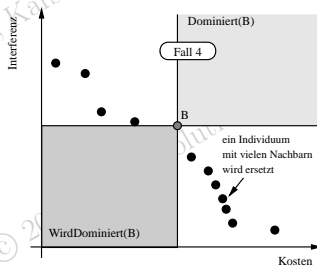
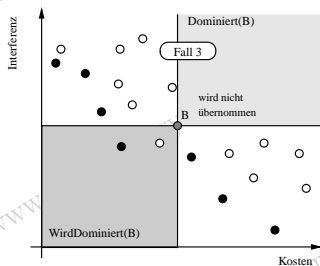
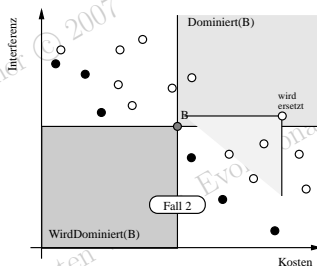
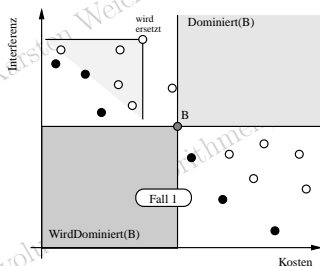
Fall 3: $\text{Dominiert}(B)$ ist leer und $\text{WirdDominiert}(B)$ ist nicht leer

$\Rightarrow B$ bleibt unberücksichtigt

Fall 4: beide Mengen leer und kein Individuum wird von einem anderen dominiert

\Rightarrow übernehmen, gemäß eines Maßes für Nischenbildung löschen

Antennenplatzierung



Antennenplatzierung

Selektion

- Datenstruktur für die Population: zweidimensionaler Bereichsbaum
- Bereiche entsprechen den beiden Zielfunktionswerten
- Suchen, Einfügen und Löschen ist in $\mathcal{O}(\log^2 \mu)$
- zweidimensionale Bereichsanfragen (alle Individuen in diesem Bereich) in $\mathcal{O}(k + \log^2 \mu)$ (mit Anzahl k der gefundenen Individuen)

Antennenplatzierung

Algorithmus

ANTENNEN-OPTIMIERUNG(Antennenproblem)

```

1   $t \leftarrow 0$ 
2   $P(t) \leftarrow$  initialisiere  $\mu$  Individuen mit der Reparaturfunktion
3  berechne den Rang für die Individuen in  $P(t)$ 
4  while  $t \leq G$  (maximale Generationenzahl)
5  do  $\lceil A, B \leftarrow$  selektiere aus  $P(t)$  gemäß Rang und TURNIER-SELEKTION
6       $C \leftarrow$  wende einen Operator auf  $A$  (und bei der Rekombination auf  $B$ ) an
7      berechne die Mengen  $Dominert(C)$  und  $WirdDominiert(C)$ 
8       $P(t+1) \leftarrow$  integriere  $C$  in  $P(t)$  und aktualisiere die Ränge
9       $t \leftarrow t + 1$ 
10 return nicht-dominierte Individuen aus  $P(t)$ 

```

Antennenplatzierung

Konkrete Problemdaten

- $9 \times 9\text{km}^2$ Gebiet in Zürich
- Rasterung
 - Bedarf 500m
 - Platzierung von Antennen 100m
- insgesamt: 505 Anrufe
- $\#Frequ = 128$ Frequenzen
- maximale Kapazität $MaxCap = 64$
- Stärke zwischen $MinPow = 10\text{dBmW}$ und $MaxPow = 130\text{dBmW}$

Antennenplatzierung

Kostenfunktion

- Kosten einer Antenne:

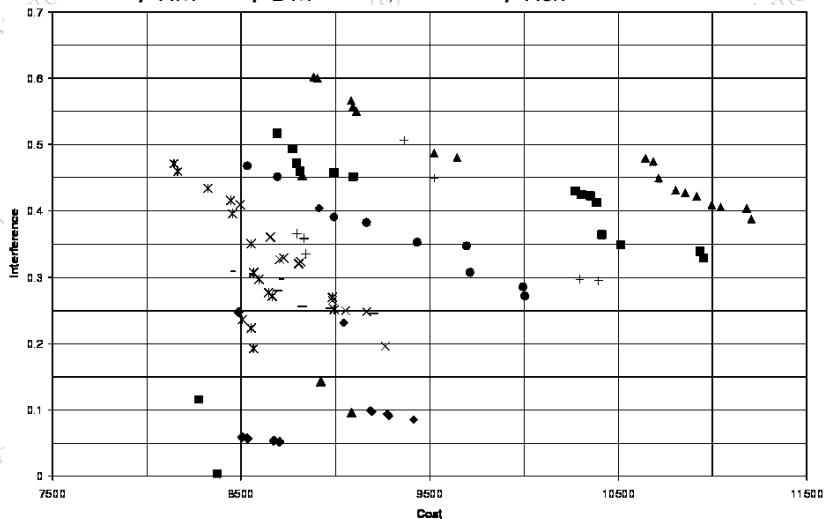
$$\text{kosten}(\text{pow}_i, \text{cap}_i) = 10 \cdot \text{pow}_i + \text{cap}_i$$

Parametereinstellungen

- Populationsgröße $\mu = 80$
- 64000 Bewertungen
- Archivgröße von 80 Individuen (SPEA)

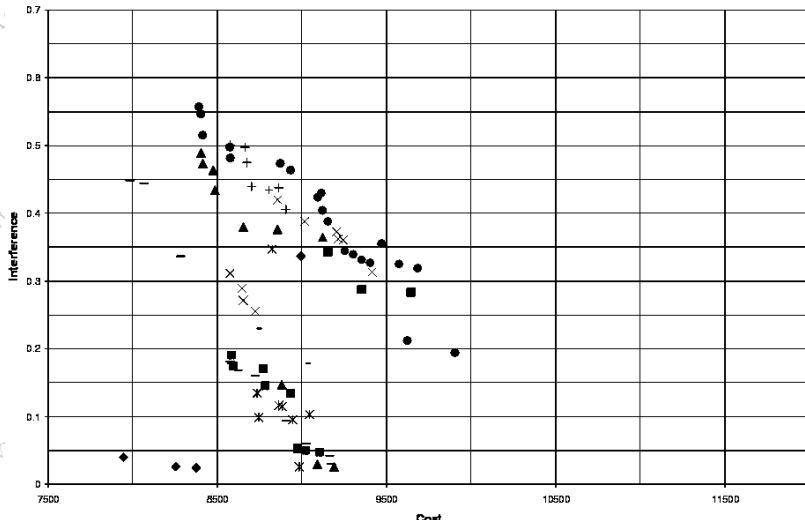
Antennenplatzierung

SPEA2, $p_{RM} = p_{DM} = 0,5$ und $p_{Rek} = 0$



Antennenplatzierung

eigene Sel., $p_{RM} = p_{DM} = 0,5$ und $p_{Rek} = 0$



Antennenplatzierung

Mehrziel-Hypothesentest

- da Fronten annähernd konvex sind:

$$\widehat{f_{interferenz}}(A) = \frac{f_{interferenz}(A)}{0,7}$$

$$\widehat{f_{kosten}}(A) = \frac{f_{kosten}(A) - 7500}{4500}$$

$$\text{Qual}(P) = \min_{A \in P} (\alpha \cdot \widehat{f_{interferenz}}(A) + (1 - \alpha) \cdot \widehat{f_{kosten}}(A))$$

- t-Test auf Werte von je 16 Experimenten

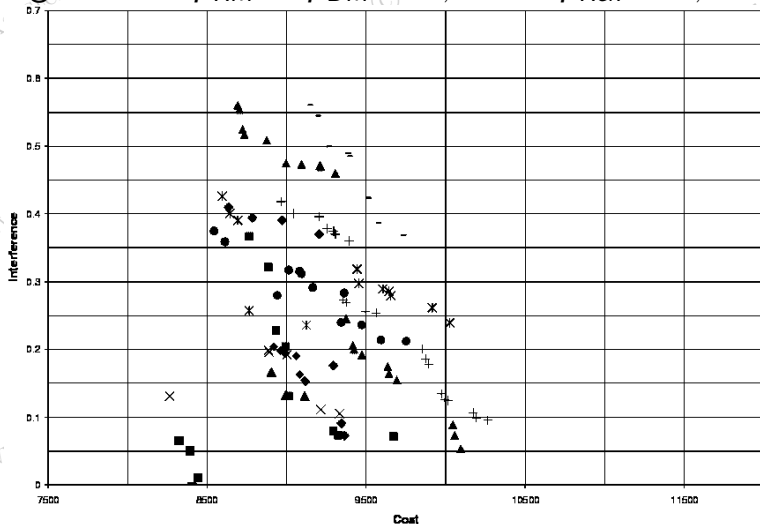
Antennenplatzierung

Mehrziel-Hypothesentest

- positiv nur wenn signifikant für alle $\alpha \in \{0, 1; 0, 2; 0, 3; 0, 4; 0, 5; 0, 6; 0, 7; 0, 8; 0, 9\}$
- signifikant: Kombination besser als rein zufällig
- kein Unterschied: vorherige Bilder
- bestes Ergebnis: nächste Seite

Antennenplatzierung

eigene Sel., $p_{RM} = p_{DM} = 0,3$ und $p_{Rek} = 0,4$



Überblick

- 1 Motorenkalibrierung
- 2 Antennenplatzierung
- 3 Stundenplanoptimierung**

Stundenplanung

Ausführende

- Marc Bufe, Tim Fischer, Holger Gubbels, Claudius Häcker, Oliver Hasprich, Christian Scheibel, Michael Wenig und Christian Wolfangel

Veröffentlichungen

- „Automated solution of a highly constrained school timetabling problem – preliminary results“, Marc Bufé, Tim Fischer, Holger Gubbels, Claudius Häcker, Oliver Hasprich, Christian Scheibel, Karsten Weicker, Nicole Weicker, Michael Wenig, Christian Wolfangel. In: Applications of Evolutionary Computing: Proc. EvoWorkshops 2001, pp. 431-440, Berlin, Springer, 2001

Stundenplanung

Lerneffekt

- Genotyp und Phänotyp agieren auf unterschiedlichen Ebenen mit einer „intelligenten“ Dekodierungsfunktion dazwischen
- Umgang mit einem hochgradig durch Randbedingungen beschränkten Problem
- kleinen Fehlentscheidungen können in einem Projekt zum Scheitern führen

Stundeplanung

Aufgabenstellung

- involvierte Objekte:
 - Unterrichtsfächer Uf (sei $u \in Uf$)
 - Lehrer Le , $l(u) \in Le$
 - Klassen Kl , $k(u) \in Kl$
 - Stundenzahl pro Woche $stunden(u) \in \mathbb{N}$
 - Räume Rm
 - Zeitschienen Zt
- Gesucht:

$$Plan : Uf \rightarrow \mathcal{P}(Zt \times Rm),$$

wobei $\#Plan(u) = stunden(u)$

Stundenplanung

harte Randbedingungen

- pro Klasse: nur eine Unterrichtsstunde gleichzeitig.
- pro Lehrer: nur eine Stunde zur selben Zeit.
- pro Raum: nur eine Unterrichtsstunde zur selben Zeit
- Unverfügbarkeit für Klassen, Lehrer und Räume
- Ausstattungsmerkmale bei Räumen und Stunden

Stundenplanung

Sport/Religion

- gekoppelte Veranstaltungen mit aufgeteilten/zusammengelegten Klassen
- Lösung: gruppierte Fächer mit mehreren Lehrern und Klassen

Stundenplanung

Weiche Randbedingungen

- Unterricht vornehmlich am Vormittag
- freie Tage von Lehrern mit Teilzeitverträgen
- Doppelstunden, 14-tägige Planung, Randstunden
- gleichmäßige Verteilung eines Fachs über die Woche
- bestimmte Fächer nicht an einem Tag
- keine Hohlstunden für Klassen
- Verfügbarkeit potentieller Aufsichtslehrer

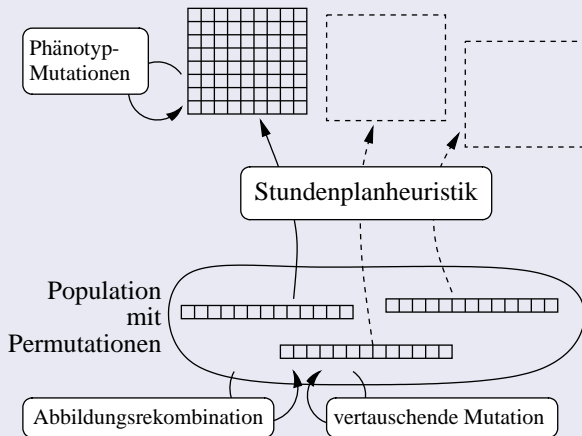
Stundenplanung

Entwurf: Grundsatzfrage

- entweder direkt auf Stundenplänen
+ lokale Operatoren möglich
- oder mit Erstellungsheuristik auf einem
Parameterraum
+ Nutzung bekannter Heuristiken
- Entscheidung: Kombination beider Verfahren

Stundenplanung

Grundkonzept



Stundenplanung

Genotyp

- Permutation der einzelnen zu planenden Fächer

Mutation

- Tausch zweier Fächer in der Planungsreihenfolge

Rekombination

- Abbildungsrekombination auf Basis des 1-Punkt-Crossover

Stundenplanung

Erstellungsheuristik

- erste Phase: freie Tage der Teilzeitkräfte
- zweite Phase: Entscheidung über Doppelstunden
- dritte Phase: Setzalgorithmus gemäß der Permutation im Genotyp

Stundenplanung

STUNDENPLAN-HEURISTIK(*Veranstaltung*)

```

1  for each Zeit ∈ {Morgen, Nachmittag}
2  do for each Randbedingungen ∈ {alle, nurHarte}
3  do for each Tag ∈ {Mo, Mi, Do, Di, Fr}
4      do suche Raum und Uhrzeit an Tag/Zeit, dass
5          alle Randbedingungen für die Veranstaltung erfüllt sind
6          if Suche erfolgreich
7              then verplane nächste unverplante Stunde in Veranstaltung
8  unverplante Stunden werden in einer Extraliste geführt

```

Stundenplanung

Wirkung der Heuristik

- Vormittag wird bevorzugt
- Versuch der gleichmäßigen Verteilung
- alle harte Randbedingungen sind erfüllt
- soweit möglich: freie Tage und Doppelstunden
- aber: einige Stunden können unverplant bleiben

Stundenplanung

Mutation des Phänotyps

- eine verplante Stunde aus dem Plan entfernen bzw.
- eine verplante Stunde an eine passende freie Stelle verschieben
- anschließend: prüfen, ob jetzt eine unverplante Stunde geplant werden kann.

Stundenplanung

Bewertungsfunktion

$$f(\textit{Stundenplan}) = \textit{unverplant}^2 + \textit{verletzt}^2 + \textit{schief}^2,$$

- *unverplant* = der gewichteten Anzahl unverplanter Stunden
- *verletzt* = der mittleren Verletzung der weichen Randbedingungen
- *schief* = Standardabweichung über die Verletzung der weichen Randbedingungen

Stundenplanung

Testdaten

- 61 Lehrer
- 23 Klassen
- 49 Räume
- 351 Fächer
- drei Parallelklassen von 5–11, Kurse in Klassen 12 und 13 jeweils als geblockte Veranstaltung für eine Klasse

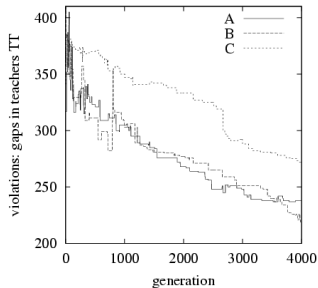
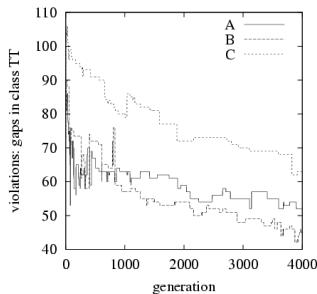
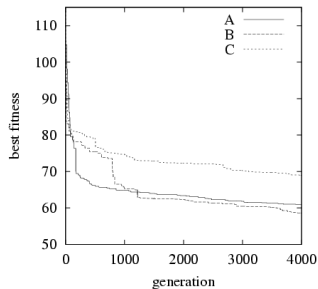
Rechenzeit

- 4000 Generationen mit $\mu = 20$: etwa 12 Stunden

Stundenplanung

drei Experimentreihen

- A: nur genotypische Operationen
- B: zunächst nur genotypische Operationen, ab Generation 1200 nur phänotypische Mutationen
- C: nur phänotypische Mutationen



A: nur genotypische Mutationen
 B: erst genotypisch, dann phänotypisch
 C: nur phänotypische Mutationen

| | A | B | C |
|-------------------------|------|------|------|
| Beste Güte | 61,0 | 58,6 | 69,0 |
| unplatziertes Fach | 1 | 0 | 0 |
| teilplatziertes Fach | 0 | 1 | 1 |
| Lücken in Klassenplänen | 52 | 45 | 63 |
| Lücken in Lehrerplänen | 238 | 219 | 272 |
| Freie Tage der Lehrer | 22 | 25 | 28 |
| Doppelstunden | 26 | 28 | 33 |

Stundenplanung

Auswertung

- grundsätzliche Richtigkeit des Ansatzes folgt aus der Verbesserung durch die phänotypische Mutation
- Ergebnisse reichen qualitativ lange nicht aus

Stundenplanung

Fehleranalyse

- Zuweisung der freien Tage in Phase 1 sorgt für Probleme (insbesondere z.B. bei Religionslehrern)
- mehr Gewicht auf lückenfreie Planung für die Klassen in der Heuristik
- heuristisches Wissen wird nicht genutzt
 - kombinierte Veranstaltungen so früh wie möglich planen
 - unverplantes mit einem zufälligen Verdrängungsalgorithmus verplanen