

DISS. ETH Nr. 20225

**PROZESSMODELL FÜR DIE
OPTIMALE PROJEKTSPEZIFISCHE
SCHALUNGSSYSTEMAUSWAHL**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN
der
ETH ZÜRICH

vorgelegt von
MAX KERSTING
Dipl.-Ing., TU München
M.Sc., Plymouth Business School

geboren am
24. Februar 1976

von
Olpe, Bundesrepublik Deutschland

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid
O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Georg Jodl

2012

ULB Darmstadt



18348420

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Übersicht	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Kurzfassung	XVII
Abstract	XIX
Teil A: Einführung in den Forschungsgegenstand	1
1 Begründung und Ziel der Arbeit	1
1.1 Globales Umfeld	1
1.1.1 <i>Produzierendes Gewerbe</i>	2
1.1.2 <i>Gegenüberstellung zur stationären Industrie</i>	2
1.1.3 <i>Darstellung des Unikatcharakters der Bauprojekte</i>	2
1.2 Markt und Branche	3
1.2.1 <i>Wettbewerbssituation in der Europäischen Baubranche</i>	3
1.2.2 <i>Wettbewerbssituation in der Schweizer Baubranche</i>	3
1.2.3 <i>Wettbewerbsvorteile durch Kostenführerschaft</i>	4
1.3 Unternehmen	5
1.3.1 <i>Teilbereiche des Bauwesens</i>	6
1.3.2 <i>Fokus auf Hochbau</i>	6
1.3.3 <i>Fokus auf Schalungssysteme</i>	6
1.4 Auswahlmethoden und Optimierungspotential	9
1.4.1 <i>Derzeit verwendete Auswahlmethode</i>	9
1.4.2 <i>Lösungsweg: Prozessbasierte, systemorientierte Auswahlmethode</i>	9
1.4.3 <i>Identifikation des Optimierungspotentials bei der Bauproduktionsplanung</i>	9
1.5 Problemstellung und Lösungsstrategie	10
1.5.1 <i>Problemstellung</i>	10
1.5.2 <i>Lösungsansatz</i>	10
1.6 Aufbau der Forschungsarbeit.....	11
2 Stand der Praxis	12
2.1 Normen.....	12
2.2 Entscheidungsfindung für die Schalungssystemauswahl	12
2.3 Netzplantechnik	14
2.4 Bauproduktionssimulationen	15
2.5 Zusammenfassung Stand der Praxis	16
3 Stand der Forschung	17
3.1 Gliederung der Prozesszeiten.....	17
3.2 Weg-Zeit-Analysen	18
3.3 Zeitmessungen und Multimomentaufnahmen	18
3.4 Arbeitseffizienz von Individuen und von Gruppen	20
3.5 Optimierung des Kapazitätseinsatzes	22
3.6 Ermittlung der Anzahl der notwendigen Krane	23
3.7 Bauproduktionssimulationen	24
3.8 Entscheidungsmodelle.....	27

3.9	Zusammenfassung Stand der Forschung	28
4	<i>Forschungslücke und Forschungsfokus</i>	29
4.1	Bewertung des Stands der Praxis – Fragen der Praxis	29
4.2	Bewertung des Stands der Forschung – Fragen der Forschung	29
4.3	Festlegung und Begründung des Forschungsfokus	29
5	<i>Forschungsmethodik</i>	31
5.1	Wissenschaftsverständnis	31
5.1.1	<i>Wissenschaftssystematik</i>	31
5.1.2	<i>Weltbild der Wissenschaftstheorien</i>	32
5.1.3	<i>Phasen des wissenschaftlichen Forschungsprozesses</i>	34
5.1.4	<i>Wissenschaftliche Güteprüfung</i>	34
5.2	Theoretischer Bezugsrahmen.....	36
5.2.1	<i>Theoretische Grundlagen der Entscheidungsfindung</i>	36
5.2.2	<i>Ökonomisches Minimalprinzip</i>	37
5.2.3	<i>Einsatz der Graphentheorie</i>	37
5.2.4	<i>Verwendung der Prozesstheorie</i>	37
5.2.5	<i>Verwendung der Systemtheorie</i>	38
5.3	Forschungsansatz Systemanbieter Bau.....	39
5.4	Forschungskonzept	39
	Teil B: Gestaltung des Prozessmodells	41
6	<i>Formale Strukturierung des Prozessmodells</i>	42
6.1	Prozesshierarchieordnung der Bauprozesse	42
6.2	Systemabgrenzung	44
6.3	Leistungsbegriffe in der Bauproduktion.....	45
6.4	Differenzierung von theoretischem Lohnstundenverbrauch und realer Elementarprozessdauer.....	47
6.5	Systematik der mathematischen Beschreibungen.....	52
6.6	Zusammenhang Arbeitstakt und Modulprozess	55
6.7	Gegenüberstellung Stockwerkbauweise – Vorauseilende Bauweise	56
6.8	Identifikation der zu untersuchenden Schalungssysteme.....	56
7	<i>Hauptmodell: Schalungs-Auswahl-Prozess-Modell</i>	58
8	<i>Teilmodell 1: Geometrisches Weg-Zeit-Analyse-Modell</i>	61
8.1	Qualitative Vorselektion	62
8.1.1	<i>Eignungskriterien</i>	62
8.1.2	<i>Kombinationsbildung</i>	64
8.2	Systemträgerschalung (Decke).....	65
8.2.1	<i>Elementarprozessgruppe Ausschalen</i>	68
8.2.1.1	<i>Elementarprozess Regel-Ausschalen</i>	70
8.2.1.2	<i>Elementarprozess Sonderarbeiten beim Ausschalen</i>	71
8.2.1.3	<i>Elementarprozess Deckenöffnung Ausschalen</i>	71
8.2.1.4	<i>Elementarprozess Ausschalen von Hilfsstützen</i>	72
8.2.1.5	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschalen</i>	72
8.2.2	<i>Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	73
8.2.2.1	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen des Regel-Ausschalens</i>	75
8.2.2.2	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Schalungseinheiten der Deckenöffnung</i>	93
8.2.2.3	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Hilfsstützen</i>	94
8.2.2.4	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	96
8.2.3	<i>Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	97

8.2.3.1	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen des Regel-Ausschalens</i>	97
8.2.3.2	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Schalungselemente der Deckenöffnung</i>	104
8.2.3.3	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Hilfsstützen</i>	107
8.2.3.4	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	108
8.2.4	<i>Elementarprozessgruppe Einschalen</i>	111
8.2.4.1	<i>Elementarprozess Regel-Einschalen</i>	112
8.2.4.2	<i>Elementarprozess Sonderarbeiten beim Einschalen</i>	113
8.2.4.3	<i>Elementarprozess Regel-Einschalen der Deckenöffnung</i>	113
8.2.4.4	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	114
8.2.5	<i>Elementarprozessgruppe Bewehren</i>	115
8.2.5.1	<i>Elementarprozess Regel-Bewehren</i>	116
8.2.5.2	<i>Elementarprozess Deckenöffnung-Bewehren</i>	116
8.2.5.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Bewehren</i>	117
8.2.6	<i>Elementarprozessgruppe Betonieren</i>	118
8.2.6.1	<i>Elementarprozess Regel-Betonieren</i>	119
8.2.6.2	<i>Elementarprozess Deckenöffnung-Betonieren</i>	119
8.2.6.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Betonieren</i>	120
8.2.7	<i>Zusammenfassung aller Elementarprozesse der Systemträgerschalung als Deckenschalung</i>	121
8.3	<i>Deckentische</i>	124
8.3.1	<i>Elementarprozessgruppe Ausschalen</i>	126
8.3.1.1	<i>Elementarprozess Sonderarbeiten beim Ausschalen</i>	127
8.3.1.2	<i>Elementarprozess Montage Hilfsstützen</i>	128
8.3.1.3	<i>Elementarprozess Ausschalen von Hilfsstützen</i>	129
8.3.1.4	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschalen</i>	129
8.3.2	<i>Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	130
8.3.2.1	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Deckentischelemente</i>	131
8.3.2.2	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	146
8.3.3	<i>Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	147
8.3.3.1	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Deckentischelemente</i>	148
8.3.3.2	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Hilfsstützen</i>	152
8.3.3.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	153
8.3.4	<i>Elementarprozessgruppe Einschalen</i>	155
8.3.4.1	<i>Elementarprozess Regel-Einschalen</i>	155
8.3.4.2	<i>Elementarprozess Sonderarbeiten beim Einschalen</i>	156
8.3.4.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschalen</i>	158
8.3.5	<i>Elementarprozessgruppe Bewehren</i>	159
8.3.5.1	<i>Elementarprozess Regel-Bewehren</i>	160
8.3.5.2	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Bewehren</i>	160
8.3.6	<i>Elementarprozessgruppe Betonieren</i>	161
8.3.6.1	<i>Elementarprozess Regel-Betonieren</i>	162
8.3.6.2	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Betonieren</i>	162
8.3.7	<i>Zusammenfassung aller Elementarprozesse bei Deckentischen</i>	163
8.4	<i>Deckentische mit Tischhubsystem (TLS)</i>	165
8.4.1	<i>Elementarprozessgruppe Ausschalen</i>	166
8.4.2	<i>Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	168
8.4.2.1	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Deckentische</i>	169
8.4.2.2	<i>Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Hilfsstützen</i>	176
8.4.2.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschal-Umsetzen</i>	178
8.4.3	<i>Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	179
8.4.3.1	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Deckentische</i>	180
8.4.3.2	<i>Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Hilfsstützen</i>	184
8.4.3.3	<i>Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschal-Umsetzen</i>	186
8.4.4	<i>Elementarprozessgruppe Einschalen</i>	190
8.4.5	<i>Elementarprozessgruppe Bewehren</i>	191

8.4.6	Elementarprozessgruppe Betonieren	192
8.4.7	Zusammenfassung der Elementarprozesse bei Deckentischen mit Tischhubsystem bei Variante 1 und bei Variante 2	193
8.5	Schachtschalung und Rahmenschalung (Wand).....	196
8.5.1	Elementarprozessgruppe Schalen der Schachtschalung.....	200
8.5.1.1	Elementarprozess Ausschalen der Schachtschalung.....	201
8.5.1.2	Elementarprozess Umsetzen der Schachtschalung	202
8.5.1.3	Elementarprozess Einschalen der Schachtschalung.....	202
8.5.1.4	Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Schalen der Schachtschalung	203
8.5.2	Elementarprozessgruppe Bewehren.....	205
8.5.3	Elementarprozessgruppe Einschalen der Rahmenschalung.....	207
8.5.3.1	Elementarprozess Einschal-Umsetzen der Rahmenschalung.....	208
8.5.3.2	Elementarprozess Einschalen der Rahmenschalung	213
8.5.3.3	Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Einschalen der Rahmenschalung.....	214
8.5.4	Elementarprozessgruppe Betonieren	215
8.5.5	Elementarprozessgruppe Ausschalen der Rahmenschalung.....	217
8.5.5.1	Elementarprozess Ausschalen der Rahmenschalung	218
8.5.5.2	Elementarprozess Ausschal-Umsetzen der Rahmenschalung.....	219
8.5.5.3	Zusammenfassung der Elementarprozesse der Elementarprozessgruppe Ausschalen der Rahmenschalung.....	220
8.5.6	Zusammenfassung aller Elementarprozesse bei Schacht- und Rahmenschalungen	221
8.6	Selbstkletterplattform (SCP)	223
8.6.1	Elementarprozessgruppe Ausschalen	225
8.6.2	Elementarprozessgruppe Heben	228
8.6.3	Elementarprozessgruppe Einschalen – Innen	230
8.6.4	Elementarprozessgruppe Bewehren.....	232
8.6.5	Elementarprozessgruppe Einschalen – Aussen	234
8.6.6	Elementarprozessgruppe Betonieren	236
8.6.7	Zusammenfassung aller Elementarprozesse bei Selbstkletterplattform.....	238
9	Teilmodell 2: Arbeitszeit-Verbrauchs-Analyse-Modell	240
9.1	Ressourcenverfügbarkeit.....	241
9.2	Neuer Ansatz für die Gruppen-Nutzleistung mittels der Arbeitseffizienz.....	243
9.2.1	Bisheriger Ansatz mit linearem Zusammenhang von Einzel- und Gruppen-Nutzleistung ...	243
9.2.2	Neuer Ansatz mit nicht-linearem Zusammenhang von Einzel- und Gruppen-Nutzleistung	244
9.2.3	Bestimmung der realen Elementarprozessdauer.....	246
9.3	CYCLONE-Analyse bei interagierenden Prozessen.....	249
9.3.1	Vorbereitung der CYCLONE-Analyse.....	249
9.3.2	Durchführung der CYCLONE-Analyse.....	252
9.3.3	Graphische Auswertung der CYCLONE-Analyse.....	255
9.3.4	Bestimmung der Wartezeitanteile und der Gesamtwartezeit.....	256
9.3.5	Wartezeitenkoeffizientenanalyse	259
9.3.6	Wartezeitenkoeffizientenanalyse für Tischhubsysteme	265
9.4	Arbeitsgruppenbildung.....	270
9.4.1	Arbeitsgruppenbildung bei konstanter Arbeitseffizienz.....	270
9.4.2	Arbeitsgruppenbildung bei variabler Arbeitseffizienz.....	272
9.4.3	Anordnungsbeziehungen zwischen Elementarprozessen	275
9.4.4	Arbeitsgruppenbildung bei der CYCLONE-Analyse	277
9.5	Arbeitskräfteeinsatzplanung.....	280
9.5.1	Ermittlung des Zielarbeitsstaktes.....	280
9.5.2	Optimierte Arbeitskräfteeinsatzplanung.....	282

9.6	Realer Lohnstundenverbrauch	286
9.6.1	<i>Realer Lohnstundenverbrauch der Elementarprozesse</i>	286
9.6.2	<i>Zusammenhang Arbeitseffizienz und realer Lohnstundenverbrauch</i>	287
9.6.3	<i>Realer Lohnstundenverbrauch der Elementarprozesse pro Ebene</i>	290
9.6.4	<i>Schalungsvorbereitung und -nachbereitung</i>	291
9.6.5	<i>Relevanter Gesamtlohnstundenverbrauch</i>	295
10	<i>Teilmodell 3: Logistik-Interaktionen-Analyse-Modell</i>	297
10.1	LogIn-Analyse mit CYCLONE für Fassade und Ausbau	298
10.2	LogIn-Analyse mit Kranbelegungsauswertung	298
10.2.1	<i>Logistik bei Ausbau und Fassade</i>	298
10.2.2	<i>Einfacher Hub</i>	301
10.2.3	<i>Kombinierter Hub</i>	303
10.2.4	<i>Kopplung Kranbelegung und Arbeitskräfteanzahl</i>	306
10.2.5	<i>Gegenüberstellung CYCLONE-Analyse und Auswertung kombinierter Hub</i>	312
10.2.6	<i>Kopplung Rohbau mit Ausbau und Fassade</i>	313
11	<i>Teilmodell 4: Kosten-Analyse-Modell</i>	318
11.1	Schalungsrelevante Gesamtlohnkosten	320
11.1.1	<i>Mittellohn und Gesamtlohnkosten</i>	320
11.2	Kosten durch Zusatzmaterial	322
11.3	Schalungsrelevante Inventarkosten	322
11.4	Schalungsrelevante Fremdleistungskosten	326
11.5	Mehr- oder Minderkosten der Baustelleneinrichtung durch Bauzeitveränderung	327
11.6	Bonus- oder Maluszahlungen durch Bauzeitveränderung	328
11.7	Ermittlung der schalungsrelevanten Gesamtkosten	329
11.8	Optimierungspotenzial durch genetischen Algorithmus	330
11.9	Projektspezifische komparative Kostenanalyse verschiedener Bauverfahren	331
11.10	Sensitivitätsanalyse	332
12	<i>Softwarearchitektur für die Suche nach einer optimalen Umsetzreihenfolge von Deckentischen</i>	333
12.1	Ziel und Struktur des Exkurses	333
12.1.1	<i>Ziel des Exkurses zur Softwarearchitektur für die Suche nach einer optimalen Umsetzreihenfolge von Deckentischen</i>	333
12.1.2	<i>Struktur des Exkurses</i>	333
12.2	Einleitung zum Exkurs	334
12.3	Algorithmen zur Reduktion des Berechnungsaufwandes	336
12.3.1	<i>Festlegung der systemimmanenten und projektspezifischen Randbedingungen</i>	336
12.3.2	<i>Grundsätzliche Lösungsstrategie</i>	338
12.3.3	<i>Begründung für den Ausschluss einer vereinfachten Lösungsstrategie</i>	339
12.3.4	<i>Anzahl der theoretisch möglichen Variationen der Umsetzreihenfolge bei Enumeration</i>	341
12.3.5	<i>Aussortieren von nicht gangbaren Variationen durch Ausschlusskriterien</i>	342
12.3.6	<i>Zwischenergebnisse durch geeignete Variationsregelungen effektiv einsetzen</i>	345
12.4	Auswirkungen der Variationsregelung	349
12.5	Exkurs Definitionen zur VBA-Programmierung	350
12.5.1	<i>VBA-Variablen</i>	350
12.5.2	<i>VBA-Datenfelder</i>	350
12.5.3	<i>VBA-Prozeduren</i>	352
12.5.4	<i>VBA-Kontrollstrukturen</i>	353
12.5.5	<i>VBA-Kommentare</i>	354

12.5.6	VBA-Beispielcode	354
12.6	Entwicklung von Strukturen für den Algorithmus	355
12.6.1	Nummerierung der Felder auf Ebene i und Ebene $i+1$	355
12.6.2	Differenzierung zwischen Ebene i und Ebene $i+1$	355
12.6.3	Lokalisierung der Felder.....	356
12.6.4	Ausrichtung der Felder.....	357
12.6.5	Entfernungen zwischen den Feldern	358
12.6.6	Zustandseigenschaft eines Feldes auf der Ebene i bzw. auf der Ebene $i+1$	360
12.6.7	Bestimmung der Verschiebemöglichkeiten in Abhängigkeit der Belegung der Nachbarfelder.....	362
12.6.8	Bestimmung der Verschiebedauern zwischen den Feldern	364
12.6.9	Bestimmung der Verschiebemöglichkeiten auf der Ebene i	370
12.7	Suche nach dem kürzesten Weg	372
12.7.1	Suche nach dem kürzesten Weg mit dem Dijkstra-Algorithmus.....	372
12.7.2	Suche nach dem kürzesten Weg mit dem A*-Algorithmus (A-Stern-Algorithmus).....	373
12.7.3	Begrifflichkeiten für den A*-Algorithmus	374
12.7.3.1	Kostenfunktion, heuristische Funktion und Schätzfunktion.....	374
12.7.3.2	Datenfeld Aktuelles_Feld.....	375
12.7.3.3	Datenfeld OpenList.....	376
12.7.3.4	Datenfeld ClosedList.....	376
12.7.3.5	Kategorisierung der Knoten	377
12.7.4	Beispielrechnung für den A*-Algorithmus	378
12.7.4.1	Erster Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 4	379
12.7.4.2	Zweiter Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 3	381
12.7.4.3	Dritter Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 2	383
12.7.4.4	Vierter Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 9	385
12.7.4.5	Fünfter Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 16	387
12.7.4.6	Sechster Untersuchungsschritt des Beispiels: Aktuelles Feld = Feld 15	389
12.7.4.7	Abschluss des Beispiels: Zielfeld erreicht.....	390
12.7.5	Operationen in der OpenList mit der Datenstruktur Heap	392
12.8	Vorbereitung und Durchführung der CYCLONE-Analyse	393
12.8.1	Vorbereitung für die CYCLONE-Analyse: Umsetzung der Suche nach gangbaren Variationen	393
12.8.1.1	Definition der Datenfelder	393
12.8.1.2	Konzeptionierung des Suchalgorithmus	394
12.8.1.3	Suchalgorithmus – Beispiel 1	397
12.8.1.4	Suchalgorithmus – Beispiel 2	401
12.8.1.5	Einzulesende Variablen	404
12.8.1.6	Datenfelder für die CYCLONE-Analyse.....	405
12.8.2	Durchführung der CYCLONE-Analyse.....	406
12.8.2.1	Bestimmung der Startpunkte für Transfer A und Transfer B.....	408
12.8.2.2	Berechnungen für die CYCLONE-Analyse mit VBA-Code.....	409
12.8.2.3	Bestimmung des Endergebnisses	414
12.8.2.4	Auswertung der Wartezeiten	415
13	Realisierbarkeitstest: Reliabilität mittels Beispielrechnung	416
13.1	Vorbereitungen für die Beispielrechnung	416
13.1.1	Gebäudegeometrie	416
13.1.2	Ressourcenverfügbarkeit und Arbeitseffizienz.....	417
13.1.3	Ergebnisse aus Datenaufnahmen auf Baustellen.....	418
13.1.4	Exceltool für die CYCLONE-Analyse	419
13.2	Durchführung der Beispielrechnung.....	420
13.2.1	Auswertung der Beispielrechnung	420
13.2.2	Weiteres Optimierungspotenzial	424

13.2.3	<i>Vergleichende Betrachtung</i>	425
13.2.4	<i>Konsequenzen aus der Beispielrechnung</i>	426
13.3	Abschliessende Bewertung der Beispielrechnung.....	426
Teil C: Beurteilung und Ausblick		427
14	Zusammenfassende Beurteilung	428
14.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Arbeit	428
14.2	Bedeutung der Ergebnisse für die Praxis.....	429
14.3	Bedeutung der Ergebnisse für die Wissenschaft.....	429
15	Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf	431
Bilderverzeichnis		432
Tabellenverzeichnis		437
Abkürzungsverzeichnis		438
Formelverzeichnis		439
Literaturverzeichnis		443
Lebenslauf		449