

ENTWICKLUNG EINER ADAPTIVEN PROZESS-

FÜHRUNG DES KABELUMMANTELUNGS-

PROZESSES UNTER VERWENDUNG DER

PROZESSRECHNERSPRACHE PEARL

Prof. Dr.-Ing. G. Menges

Dipl.-Ing. F. Ramm

Aachen

Institut für Kunststoffverarbeitung

28.7.1980

Eine Kabelummantelungsanlage besteht im allgemeinen aus den Anlageteilen Ab- und Aufwickler, Kunststoffextruder, Kühlstrecke, Schub- und Abzugsraupe, Meßsystemen zur Dicken- und Exzentrizitätsmessung des gefertigten Kabels, Temperatur und Druckmessung der Schmelze, sowie Regelsystemen zur Zonentemperaturführung, Schneckendrehzahl und Abzugsgeschwindigkeit. Weitere externe Regelkreise kontrollieren die Auf- und Abwickelsysteme und eventuell die Kühlwassertemperatur.

Die Kabelfertigung vollzieht sich in verschiedenen Prozeßzuständen. Zunächst muß der Kunststoffextruder aufgeheizt und auf Betriebstemperatur gebracht werden. Gleichzeitig kann das nächste zu fertigende Kabel in die Strecke eingezogen werden. Nach Einrichtende und Erreichen der Betriebstemperatur ist die Anlage anfahrbereit. Üblicherweise wird die Schmelze, die im Aufheizvorgang im Extruder aufgeheizt wurde, nicht mit verarbeitet, sodaß nach dem sogenannten "Spülen" und Zentrieren der Düse die eigentliche Kabelfertigung beginnt. Liegt die Endfertigungsgeschwindigkeit oberhalb der Geschwindigkeit, mit der das Anbinden des Kabels auf die noch leere Aufwickeltrommel möglich ist, so muß durch geeignete Prozeßführung noch einmal kurzzeitig die Geschwindigkeit abgesenkt werden.

Bei der Fertigung vieler Kabeltypen (Energiekabel, Litzen) treten häufig Anfahrvorgänge auf. Dies bedeutet, daß der Kunststoffextruder aufgrund großer Schneckendrehzahlverstellung eine längere instationäre Phase durchläuft. Erst bei Eintritt des neuen stationären thermodynamischen Zustandes stellt sich ein gleichbleibender Masseausstoß zur Ummantelung des Kabels ein.

In Bild 1 ist beispielhaft der Verlauf der Prozeßausgangsgrößen nach Verstellung der Schneckendrehzahl dargestellt. Je nach dem Zustand im Extruder kann es für den Massedurchsatzverlauf entgegen der Darstellung in Bild 1 auch zu vorübergehenden Maxima und Minima mit Unterschieden bis zu 20% kommen, ehe ein neuer Massedurchsatz erreicht wird /1/.

Chargenschwankungen des Kunststoffgranulates verändern den Massedurchsatz ebenfalls. Ziel der Prozeßrechnersteuerung ist die Konstanzhaltung der Kabelgeometrie vom Start der Kabelfertigung an. Hierzu wird ein Prozeßmodell eingesetzt. Aus dem meßtechnisch erfaßbaren Verhalten für Massedruck P_M , Massetemperatur T_M und Schneckendrehzahl n_S in der Vergangenheit wird unter Berücksichtigung des Werkzeugwiderstandes und der Zonentemperaturführung des Extruders der Massedurchsatz für die nächste Zukunft vorausbestimmt /2,3/. Dies ist in Bild 2 schematisch dargestellt. In Bild 3 ist das gesamte Prozeßführungs-konzept der Rechnersteuerung, das die genannten Anforderungen verarbeitet und ausführt, dargestellt. In einer Vorwärtsstrategie können aufgrund der Messungen von Massedruck, Massetemperatur und Schneckendrehzahl und dem Prozeßführungs-konzept zum Führen und Anheben der Fertigungsgeschwindigkeit die Regelkreise der Schneckendrehzahlregelung und Abzugsregelung mit neuen Sollwerten $n_{S \text{ Soll}}(t)$ und $V_{ab \text{ Soll}}(t)$ versorgt werden. Die Reaktion der Abzugsregelstrecke wirkt sich mit seinem Istwert $V_{ab}(t)$ am Ort der Formgebung (Werkzeug) aus. Die Schneckendrehzahlregelung bewirkt den gezielt sich einstellenden Massedurchsatz $m(t)$ ebenfalls am Ort der Formgebung, so daß hier die Istwandstärke $S(t)$ entsteht. Gleichzeitig verändern sich die meßbaren Prozeßgrößen $n_S(t)$, $T_M(t)$, $P_M(t)$ und $T_Z(t)$ des Extruders. Somit kann das instationäre Massedurchsatzverhalten des Extruders durch geeignete Sollwertführung der Regelkreise der Abzugsgeschwindigkeit oder der Schneckendrehzahl abgefangen werden. Totzeit behaftet kann die Zielgröße $S(t)$ gemessen werden. Mittels einer ersten Rückführung kann über einen Hilfsregler eine sich einstellende Regelabweichung der Zielgröße durch Umschaltung auf den Summenpunkt zur Bildung des Abzugssollwertes bzw. des Schneckendrehzahlsollwertes ausgeregelt werden. Eine zweite Möglichkeit zur Optimierung der Prozeßführung besteht in der adaptiven Anpassung der Modellparameter. Hierzu müssen die verschiedenen Meßwerte zeitlich koordiniert werden.

Das Prozeßprogramm, in dem die oben genannten Anforderungen und Ablaufmechanismen eingebracht wurden, wurde in PEARL /5,6/ geschrieben und deckt alle Phasen des Kabelfertigungsprozesses ab /4/.

Im einzelnen wurden realisiert:

- 1) Komfortable Dialoge zur Eingabe der erforderlichen Daten; Weitgehende Sicherung gegen Bedienungsfehler und fehlerhafte bzw. unbefugte Eingaben; Dokumentation aller relevanten Daten auf Drucker, Display und Diskette;
- 2) Umfangreiche Peripherie-Testprogramme zur Installations- und Anlagentesthilfe;
- 3) Messung und Prüfung der Prozeßgrößen: 7 Zonentemperaturen, Massetemperatur, Massedruck, Leiterdurchmesser (Innendurchmesser), Kabeldurchmesser (Außendurchmesser); Berechnung folgender Prozeßgrößen: Massedurchsatz, Kabellänge, Isolationswandstärke;
- 4) Regelung der 7 Zonentemperaturen; Kaskadenregelung der Massetemperatur; Sollwertführung für die Massetemperatur unter Berücksichtigung zu erwartender Drehzahlverstellungen; Regelung der Liniengeschwindigkeit; Regelung der Schneckendrehzahl; Sollwertführung für Liniengeschwindigkeit und Schneckendrehzahl unter Verwendung eines Prozeßmodells; On-line Modellanpassung; Wahlweise Regelung der Wandstärke oder des Außendurchmessers unter Berücksichtigung der Materialschwindung; On-line Funktionstest der gesamten Prozeßrechnerperipherie pro Abtastzeit;
- 5) Stellwertausgabe für alle Regelkreise;
- 6) Einfache Bedienung der Anlage über ein Steuerpult; Bedienungserleichterung durch Automatik-Funktionen: Zurückschalten auf konv. Steuerung während des Einrichtens, Anfahrsperr im Störfall, Runterfahren vor Erreichen der Fertigungslänge, Anhalten nach Erreichen der Fertigungslänge, Anhalten nach Erreichen des Kabelendes, langsames Heranfahren des Kabelanfanges an den Aufwickler;
- 7) Fortlaufendes Zustandsprotokoll der Anlage: Anzeige aller Soll- und Istwerte, Bedienungshinweise;
- 8) Störprotokoll während der Produktion: Störquelle, aktuelle Kabellänge
- 9) Betriebsprotokoll nach jeder abgeschlossenen Fertigung: Soll- und Istwerte, Uhrzeiten, Qualitätsstatistik;

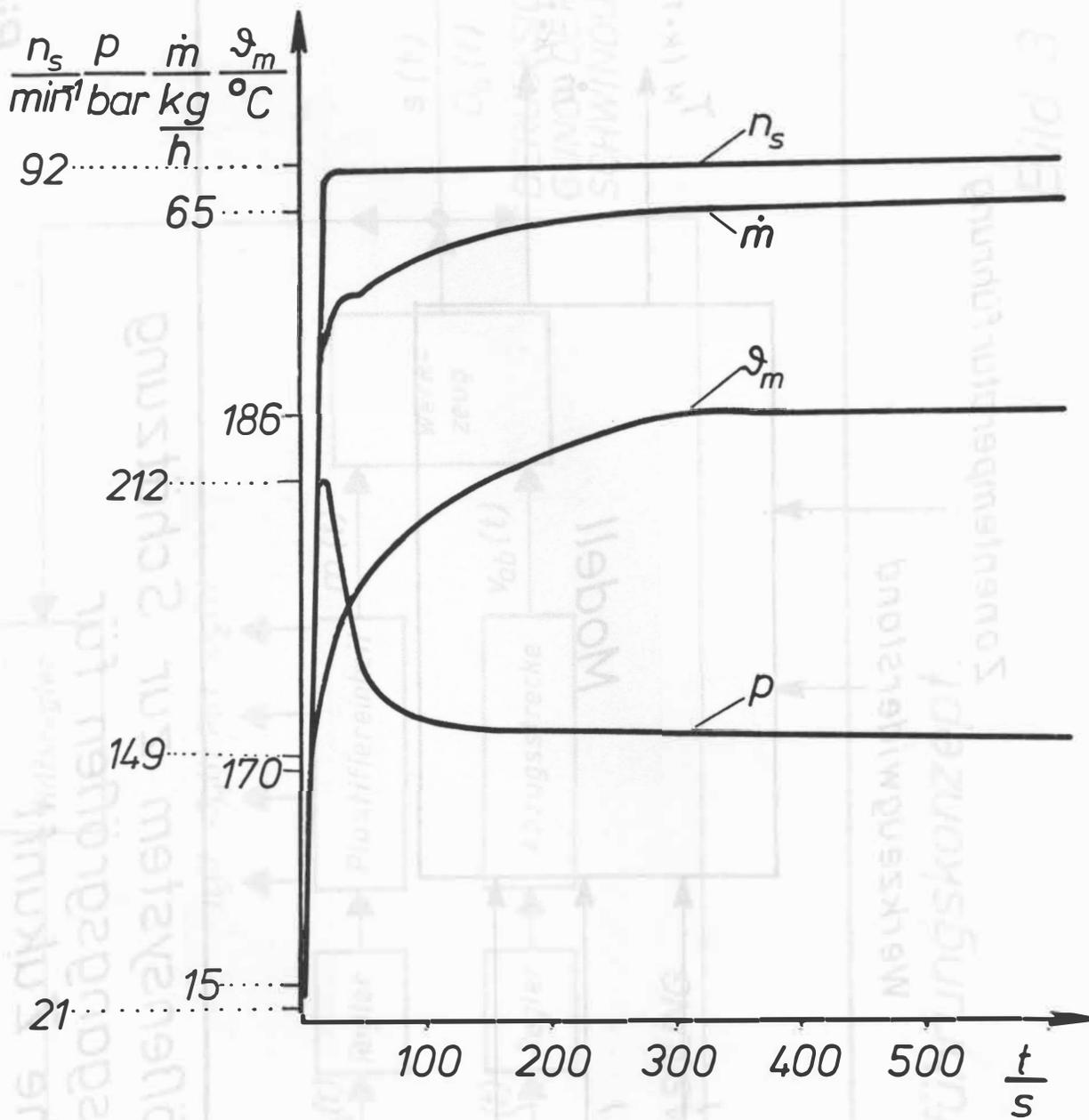
Das Programm ist modular aufgebaut, so daß die jeweiligen spezifischen Probleme jeder Fertigungsphase in einzelnen Modulen behandelt werden können. Die Objekte (z.B. Variablen oder Tasks), die in mehreren Modulen benötigt werden, müssen im sogenannten Global-Block vereinbart werden. Modulen setzen sich im Probleenteil aus Tasks und Prozeduren zusammen. Tasks sind eigenständige Programme, mit deren Hilfe z.B. Teilprobleme der Prozeßführung behandelt werden können. Tasks sind direkt oder zyklisch aufrufbar. Zyklisch arbeitende Tasks werden eingesetzt z.B. zur Regelung von Antriebsmotoren (Schnecken-drehzahl, Abzugsraupe) mit einer Abtastzeit von 300ms, zur Berechnung der Sollwertführung (900ms) und für Temperaturregelung (20 s). Die für alle Regelungen gleichermaßen benutzte PID Reglerstruktur wiederum ist in eine für alle Tasks aufrufbare Funktionsprozedur untergebracht. Die Synchronisation zwischen Sollwertführungen und Antriebsregelung zu jeder dritten Abtastzeit ist einfach durchführbar mit Hilfe von Synchronisationsvariablen (Semaphoren). Mit Semaphorenverriegelung ist unabhängig von der Prioritätenvergabe für Tasks eine gezielte zeitliche Abarbeitungsfolge zu erreichen. Diese ist nicht unbedingt durch die Prioritätenvergabe der einzelnen Tasks gewährleistet, da die höherpriorie Task durchaus die CPU, z.B. bei Messungen mit dem A/D-Wandler, kurzzeitig freigeben kann, so daß niederpriorie Tasks abgearbeitet werden können. Durch die Prioritätenvergabe war es andererseits möglich, die zeitkritischen Regelungs- und Sollwertführungstasks gegenüber z.B. der Task zur Anpassung der Modellparameter zu bevorzugen, somit den zeitlichen Ablauf des Programms zu sichern. Um kurze Programmabarbeitungszeiten während einer Abtastzeit zu erreichen, können zur Datenerfassung einzelne Messungen über A/D-Wandler und digitale Eingaben durch Aktivierung mehrerer Meßtasks quasi parallel durchgeführt werden. Über Interrupt aufrufbare Tasks dienen zur Eingabe neuer Sollwerte oder zur Überleitung zur nächsten Phase des Fertigungsprozesses. Ein wesentlicher Schutz gegen Fehlbedienung kann dabei dadurch erzielt werden, daß die sogenannten Signale benutzt werden. Diese werden immer dann ausgelöst, wenn sogenannte Ausnahmebedingungen wie Transfer-Fehler, Formatfehler usw. auftreten.

Das Gesamtprogramm benötigt ca 50 k Arbeitsspeicherplatz, durch Klassifizierung der Tasks in arbeitsspeicherresidente und -nichtresidente ist die Benutzung kleinerer Arbeitsspeicher möglich. Der dynamische Nachlademechanismus lädt dann nach Erfordernis die jeweiligen nicht residenten Tasks mit in den Arbeitsspeicher.

Das Programm wurde in der Industrie eingesetzt. Es stellte sich heraus, daß die Prozeßführung mit der Vorwärtsstrategie und der adaptiven Modellanpassung die beste Prozeßführung erbrachte. Die nachfolgend gezeigten Ergebnisse entstanden ohne Hilfsreglereinsatz. In Bild 4 ist eine Endanpassung der Modellparameter an den realen Massedurchsatz gezeigt. Bei einer Verstellung der Liniengeschwindigkeit von 0 auf 5 m/min stellt sich zunächst aufgrund nicht angepasster Modellparameter für 2 Meter ein um ca. 4 mm zu großer Außendurchmesser ein. Der Extruder liefert einen zu großen Massedurchsatz. In den ersten 2 Metern wird dieses Verhalten des Extruders zur Modellanpassung genutzt. Das Programm war aber zunächst so aufgebaut, daß erst nach 2 Metern die Erfahrung aus der Vergangenheit zur aktiven Prozeßführung eingesetzt wird. Nach einem Anpassungszeitraum von ca. 4 bis 6 Metern taucht der Istwert der Wandstärke in ein Toleranzband $\pm 3\%$ um den Sollwert ein. Die Modellparameter sind angepaßt und die Prozeßführung so stabil, daß der Istwert das Toleranzband nicht mehr verläßt. In den folgenden Versuchen wurde die 2 Meter Lernphase reduziert. Bild 5 zeigt die Produktion einer Kabellänge von 120 m. Nach 50 m Fertigung mit einer sogenannten Anbindeggeschwindigkeit von 7 m/min wird nach Anbinden auf die Aufwickeltrommel die Fertigungsgeschwindigkeit auf 15 m/min angehoben. Nach ca. 113 m beginnt der Abfahrvorgang. Mit Hilfe des Prozeßmodells wird die Fertigung so geführt, daß der Istwert der Wandstärke ein Toleranzband von $\pm 5\%$ um den Sollwert von 2,0 mm nicht mehr verläßt. Deutlich ist zwischen 60 m und 80 m die weitere Anhebung der Schneckendrehzahl zu erkennen, mit der der erforderliche Massedurchsatzbedarf erbracht wird. In Bild 6 ist die Wirkung der Prozeßführung mittels Modell noch stärker erkennbar. Für eine Anhebung der Liniengeschwindigkeit auf

20 m/min erfolgt zunächst eine Schneckendrehzahlverstellung auf ca. 30 U/min. In dieser Verstellphase kann der Wandstärke-Istwert im Toleranzband gehalten werden. Da der Massedurchsatz für eine im folgenden konstante Drehzahl stark sinken würde, erfolgt mit Hilfe der Modellvorhersage innerhalb der nächsten ca. 1,5 min eine weitere Anhebung der Schneckendrehzahl über 50 % auf 49 U/min, die Wandstärke bleibt hierbei nahezu konstant.

Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse kann gesagt werden, daß das entwickelte Modell zur Prozeßführung des Kabelummantelungsprozesses ein wesentliches Hilfsmittel darstellt, die Vermeidung von Ausschuß in der Anfahrphase zu gewährleisten. Ein zweiter Vorteil ist, daß die Prozeßführung auch unter geänderten Prozeßbedingungen oder Chargenschwankungen ohne Vorabkenntnisse und ohne Unterstützung des Bedienungspersonals den optimalen Arbeitspunkt des Extruders selbsttätig findet.

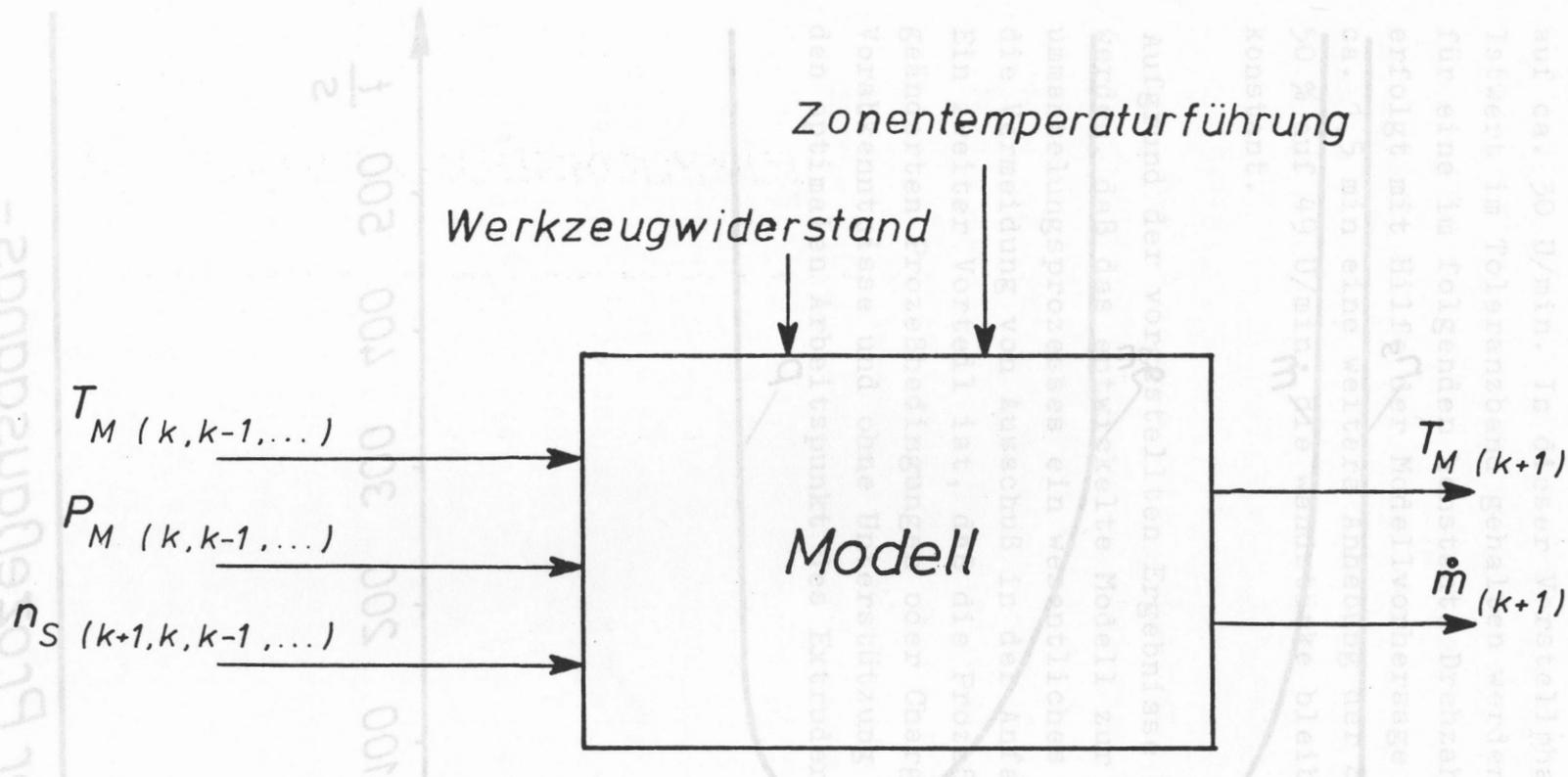


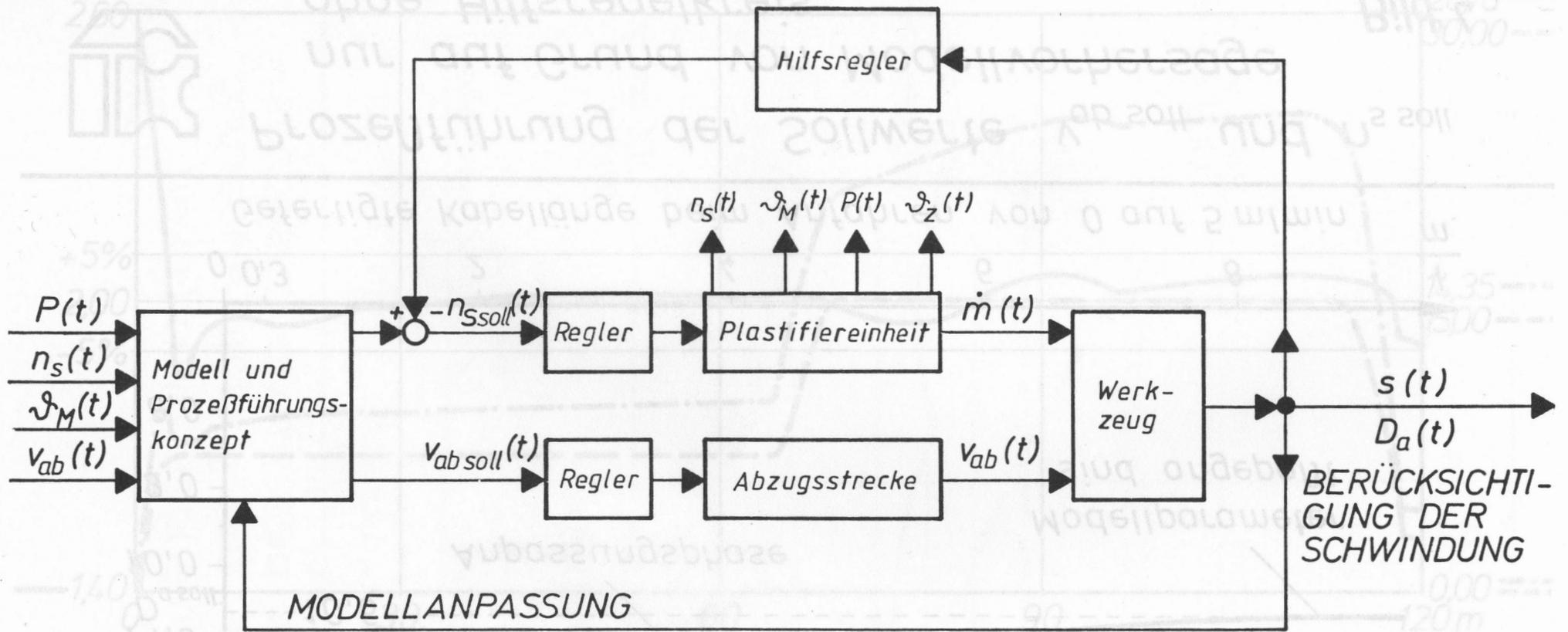
Verlauf der Prozeßausgangsgrößen nach großer Drehzahlverstellung

Bild 1



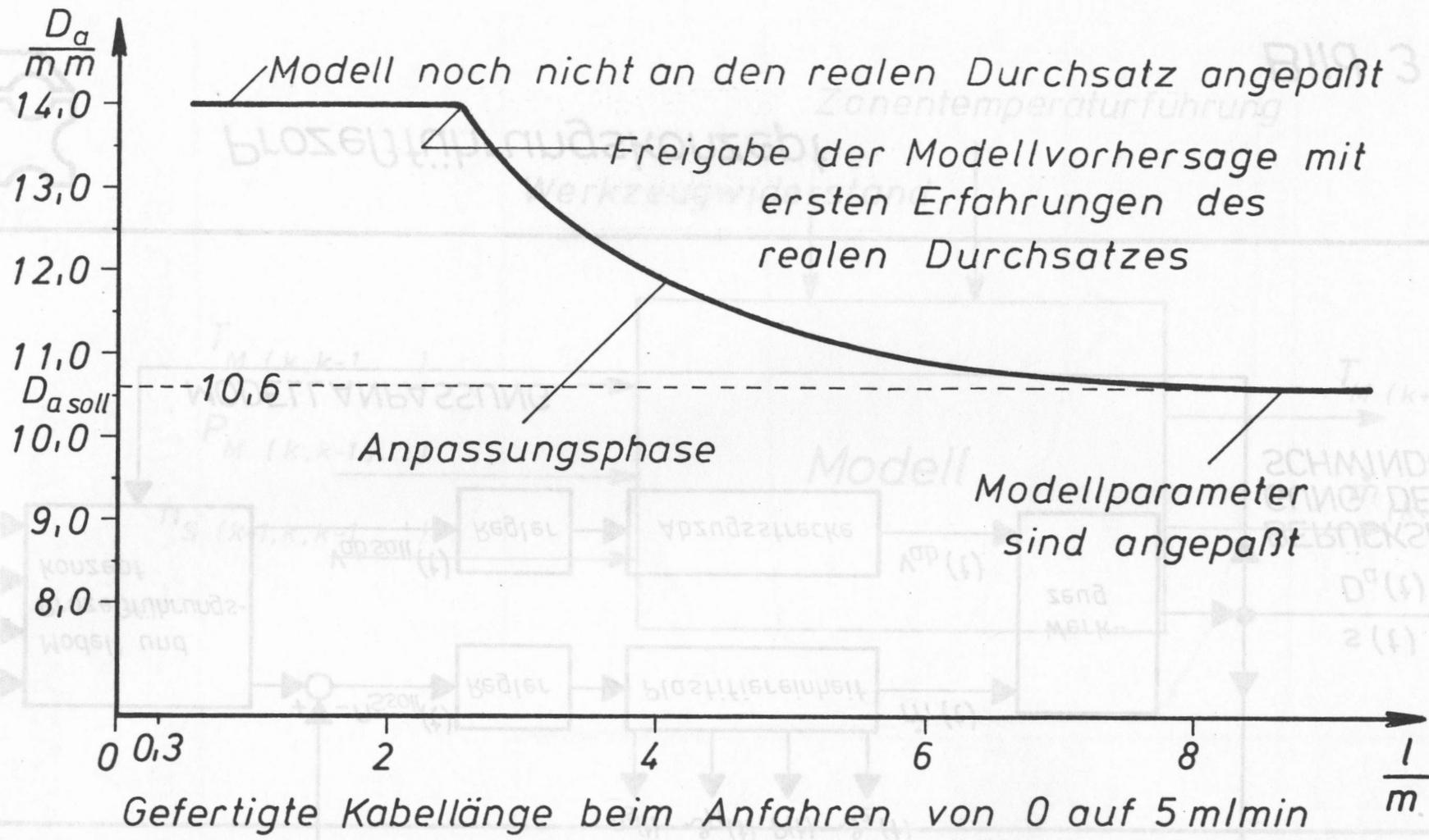
Mehrgrößensystem zur Schätzung von Ausgangsgrößen für die nahe Zukunft





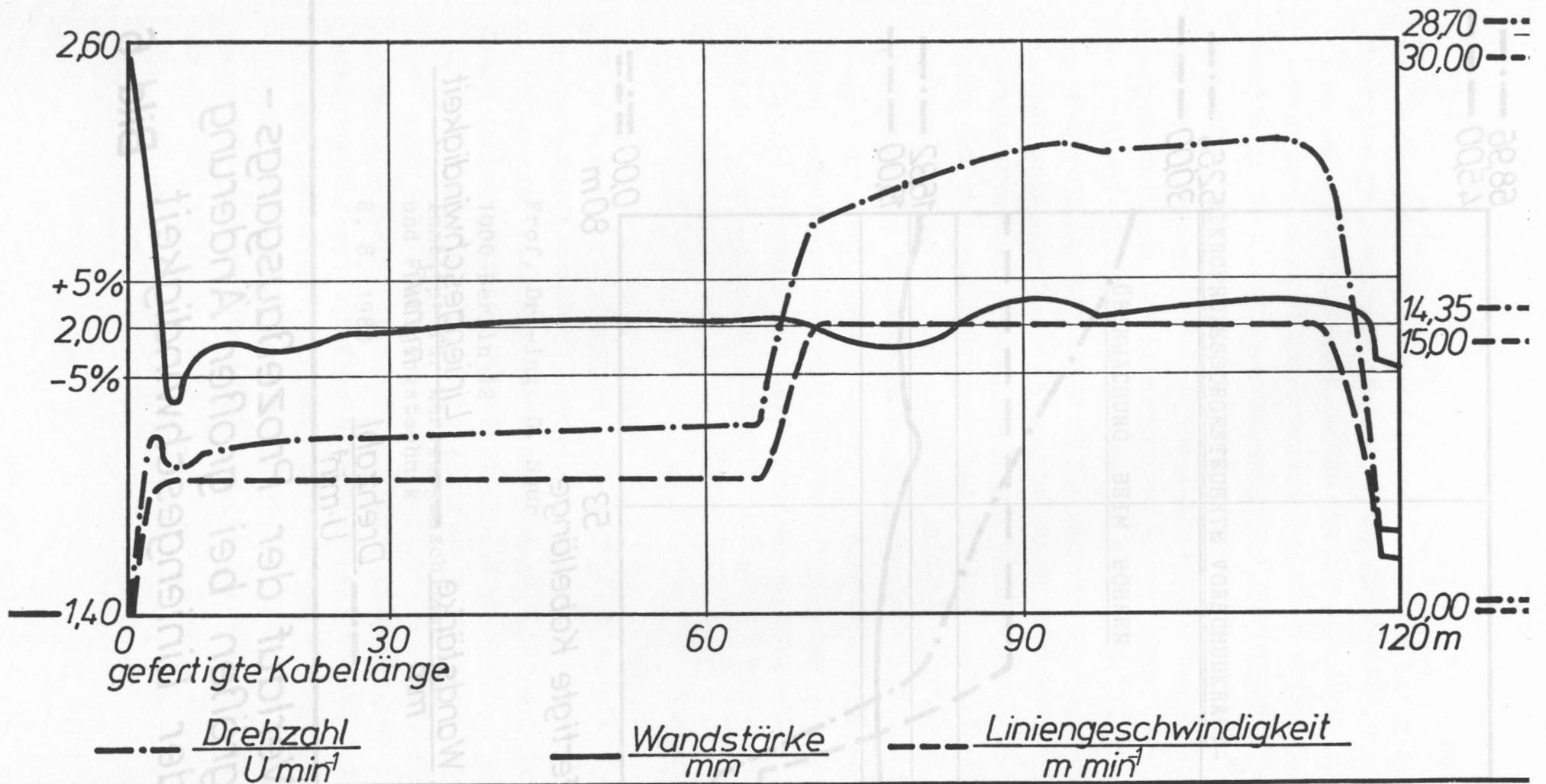
Prozeßführungs-konzept

Bild 3



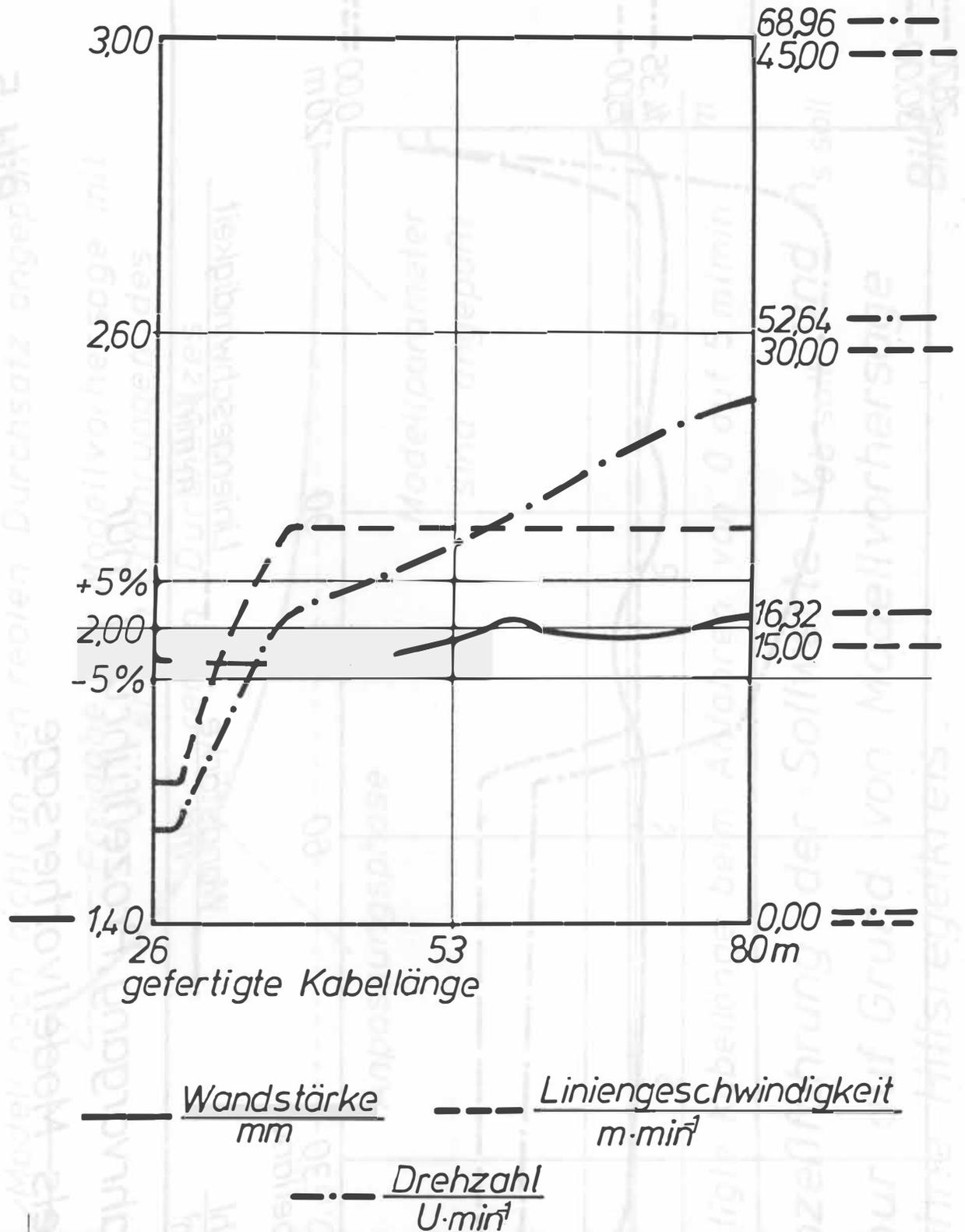
Prozeßführung der Sollwerte $v_{ab,soll}$ und $n_{s,soll}$
 nur auf Grund von Modellvorhersage
 ohne Hilfsregelkreis.

Bild 4



Anfahrvorgang, Prozessführung nur
mittels Modellvorhersage

Bild 5



Verlauf der Prozeßausgangsgrößen bei großer Änderung der Liniengeschwindigkeit

Bild 6