Vorwort

Dieses Lehr- und Fachbuch, das jetzt in seiner 8. Auflage erscheint, hat schon eine lange Tradition. Es entstand aus der Vorlesung „Fertigungsmesstechnik“ von Prof. h. c. Dr.-Ing. Wolfgang Dutschke an der Universität und an der Berufsakademie in Stuttgart. Es wird seit vielen Jahren an einer ganzen Reihe von Hochschulen in Deutschland, der Schweiz und Österreich verwendet. Das bewusst knapp gehaltene Buch ist heute nicht nur ein verlässlicher Begleiter bei der Ingenieur-, sondern auch bei der betrieblichen Ausbildung. Ältere Auflagen wurden ins Niederländische, Litauische und ins Chinesische übersetzt. Es vermittelt die Grundlagen der Fertigungsmesstechnik und gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren und Geräte. Es ist als Lehr- und Fachbuch für den Praktiker gedacht und verzichtet deshalb weitestgehend auf theoretische Betrachtungen und spezielle Verfahren. Ein ausführliches Sachwortverzeichnis dient der Verwendung als Nachschlagewerk. Das Literaturverzeichnis konzentriert sich auf weiterführende Literatur. Besonderer Wert wird auf ein aktuelles Verzeichnis von Normen und Richtlinien gelegt, um dem Leser eine effiziente Vertiefung zu ermöglichen.

Die 8. Auflage erscheint in völlig neuer Aufmachung und mit neuen Inhalten. Dr.-Ing. Michael Marxer wurde als weiterer Autor gewonnen. So kann die Kontinuität des Buches langfristig gesichert werden. Das Buch ist nun sowohl in der gewohnten Buchform als auch als e-Book erhältlich. Das neue Layout wurde noch lesefreundlicher gestaltet. Ein neues Element „Merksätze“ hebt besonders wichtige Inhalte hervor. Der bewährte Aufbau des Buches wurde beibehalten. Die Autoren haben jedoch zahlreiche Anregungen von Fachkollegen und Studierenden aufgenommen. So wurden die Kapitel Koordinaten-, Oberflächen- und Mikromesstechnik sowie berührungslos-optische Verfahren erweitert. Ferner sind neue Aspekte zur Rolle der modernen Fertigungsmesstechnik in einer beherrschten und wirtschaftlichen Produktion und Ausbildung eingegangen. Ein neues Glossar konzentriert jetzt die Erklärung wichtiger Begriffe an einer Stelle.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Kollegen und Gönner Prof. h. c. Dr.-Ing. Wolfgang Dutschke. Er hat dieses Buch vor 25 Jahren ins Leben gerufen und die Inhalte mit großem Engagement weiter entwickelt. Als Hochschullehrer konnte er mir schon als Student die Faszination der Messtechnik vermitteln. Seit der 4. Auflage hat Claus P. Keferstein die Ehre, an der Weiterentwicklung dieses Buches mitwirken zu dürfen. Mit der 7. Auflage hat sich Prof. h. c. Dr.-Ing. Wolfgang Dutschke aus der aktuellen Überarbeitung zurückgezo-

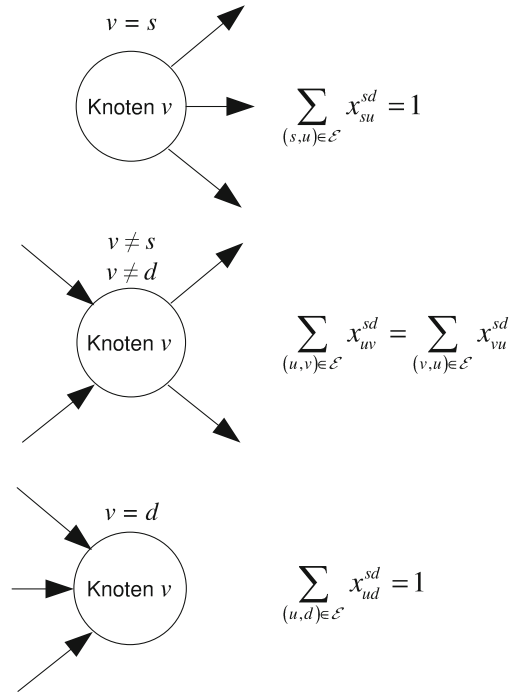

Abb. 8.1 Illustration der Kontinuitätsbedingung

Gegensatz zur „Node-Link-Formulierung“, die die Kontinuitätsrandbedingung nutzt [1]
Ein K-Kürzeste-Wege-Algorithmus findet sich im Anhang (Abschn. 23.1.2).

In den folgenden Abschn. 2.1 bis Abschn. 2.7 formulieren wir in mathematischer Form einige typische Netzplanungsprobleme, ohne schon die zugehörigen Lösungen anzusprechen. Geeignete Lösungsmethoden sind dann der Stoff des 3. Kap.

8.1 Platzierung von Kernnetzknoten

In Abb. 2.2a repräsentieren die Kreise die Positionen von Zugangsroutern oder Multiplexern, die Verkehr aggregiert haben und nun als Quellen für ein zu entwerfendes Kernnetz fungieren. Durch Quadrate sind zehn mögliche Standorte für Router des Kernnetzes angegeben. Die Planungsaufgabe besteht nun darin, jeden Zugangsrouter i mit einem Kernnetzrouter so zu verbinden, dass die Kosten für die Einrichtung von Kernnetzroutern an den möglichen Standorten j sowie die Kosten für die Anbindung der Zugangsrouter an ihre zugeordneten Kernnetzrouter minimiert werden. Das drückt sich formal in dem folgenden Optimierungsproblem aus:

Man beachte, dass dieses Problem nicht unbedingt lösbar sein muss: Es kann sein, dass man den vorhandenen Kapazitäten zu viel Verkehr zumutet.

8.3 Optimale Wegezuweisung

In der Regel werden Kommunikationsnetze (zumindest in der Planungsphase) nicht überlastet. Wir haben es vielmehr mit einem Überangebot an Kapazitäten zu tun, das dann aber in intelligenter Art und Weise genutzt werden soll. Die Ergebnisse der Warteschlangentheorie (vgl. Teil II) zeigen, dass Warteschlangen und resultierende Verzögerungen in höchst nichtlinearer Art (nämlich $\sim 1/(1-\rho)$) von der Auslastung $\rho \in [0;1)$ einer Übertragungseinrichtung abhängen, wenn wir es mit einem stochastischen Verkehrsgeschehen zu tun haben. Aus dieser Erkenntnis wächst die Idee als Optimierungsziel vorzugeben, dass der maximale Auslastungsgrad ρ_{max} minimiert werden soll. Dies hat zur Folge, dass eine möglichst gleichmäßige Auslastung aller Verbindungsleitungen angestrebt wird, wie die nachfolgende Problembeschreibung erwarten lässt.

Problem 2.4: Optimale Wegezuweisung

$$
\begin{aligned}
&\text{Minimiere:} && \rho_{max}: \\
&\text{Bedarfsrandbedingung:} && \sum_{r=1}^{R_m} x_r^m = 1\,; \qquad \forall m: \\
&\text{Kapazitätsrandbedingung:} && \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{R_m} f^m \iota_{lr}^m x_r^m \le C_l \cdot \rho_{max}\,; \qquad \forall l:
\end{aligned}
\tag{2.4}
$$

Eine Implementierung der Lösung von Problem 2.4 ist in einem reinen IP Netz allerdings nicht möglich: Die standardgemäße Wegewahl in einem IP Netz folgt dem Prinzip des Kürzeste-Wege-Algorithmus, der in Protokollen wie OSPF oder IS-IS implementiert ist [3, 4]. Mit der Festlegung einer Metrik sind auch die Wege zwischen Knoten festgelegt und nichts hält das Routing-Protokoll davon ab, Verkehre auf eine überlastete Strecke zu schicken, wenn der über alle Abschnitte aggregierte Wert der Metrik ein Minimum ausweist. Will man eine für den Netzbetrieb optimale Wegelenkung im Netz erreichen – etwa wie durch eine Lösung von Problem 2.4. vorgegeben – so kann man dies nur dadurch erreichen, dass man den Leitungsabschnitten Metrikwerte oder „Gewichte" (weights) in geeigneter Weise zuweist. Das heißt, die x_r^m in den Gln. 2.4 sind als $x_r^m(\boldsymbol{w})$ zu lesen, wobei die im Vektor $\boldsymbol{w}$ zusammengefassten Linkgewichte in diesem Fall die Entscheidungsvariablen repräsentieren, die die Werte der x_r^m (in dann leider nichtlinearer Weise) vollständig bestimmen. Eine weitere Möglichkeit, eine Lösung von Problem 2.4 zu verwerten, besteht in der Einrichtung von virtuellen Pfaden (tunnels) im Kontext von MPLS [5]. Allerdings ist diese Möglichkeit, was die Anzahl solcher Pfade angeht, in der Praxis doch sehr begrenzt.

8.4 Optische Netze

Mit der Einführung optischer Netze sind neue Dimensionierungsprobleme bekannt geworden, die über das Wege- und Kapazitätszuweisungsproblem (etwa im Sinne von Problem 2.2. oder seinen Varianten, die genau einen Weg pro Bedarf verlangen) hinausgehen. Jeder Link kann über mehrere Glasfasern verfügen, die ihrerseits eine feste Anzahl Wellenlängen unterstützen. Eine sinnvolle Fragestellung ist dann, wie die Bedarfe mit einer minimalen Anzahl von Glasfasern gedeckt werden können. Dabei ist der einfachere Fall der, bei dem jeder Knoten mit Wellenlängenkonvertern ausgestattet ist: virtual wavelength path (VWP)-Problem. Damit entfällt eine Randbedingung, die die Kontinuität der Wellenlänge längs des ausgewählten Weges einfordert. Eine Zuweisung von Wellenlängen ist dann im Rahmen des Optimierungsproblems entbehrlich und kann nach der Optimierung auf jedem Link separat durchgeführt werden. Der planerisch schwierigere Fall ist der WP (wavelength path)-Fall, der mit der Kontinuität der Wellenlänge auch die Zuordnung einer Wellenlänge zum gewählten Weg als Teil des Problems versteht. Dann kann der Netzbetreiber allerdings auch auf diesen Wellenlängenkonverter verzichten! Im Folgenden formulieren wir das

Problem 2.5: Linkdimensionierung, Wellenlängenzuweisung und Routing

$$
\begin{array}{ll}
\text{Minimiere:} & \sum_{l=1}^{L} y_l : \\
\text{Bedarfsrandbedingung (VWP):} & \sum_{r=1}^{R_m} x_r^m = f^m ; \qquad \forall m : \\
\text{Bedarfsrandbedingung (WP):} & \sum_{r=1}^{R_m} \sum_{=1}^{N} x_r^m = f^m ; \qquad \forall m : \\
\text{Kapazitätsrandbedingung (VWP):} & \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{R_m} \iota_{lr}^m x_r^m \le N \cdot y_l ; \qquad \forall l : \\
\text{Kapazitätsrandbedingung (WP):} & \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{R_m} \iota_{lr}^m x_r^m \le y_l ; \qquad \forall l; \forall \ : \\
\text{Ganzzahligkeitsrandbedingungen:} & x_r^m ; x_r^m ; y_l \in Z_+ :
\end{array}
\tag{2.5}
$$

(x_r^m: Anzahl genutzter Wellenlängen auf der Route r des Knotenpaares m; x_r^m: Anzahl von Zuweisungen von zu der Route r des Knotenpaares m, $x_r^m = \sum_{} x_r^m$; y_l: Anzahl von Glasfasern auf dem Link l; N: Anzahl möglicher Wellenlängen; Lösung: Werte von x_r^m, x_r^m und y_l).

Hier sind die Bedarfe f^m ganzzahlige Werte, die die Anzahl der für das Knotenpaar m benötigten optischen Pfade angeben. Ein solcher optischer Pfad ist durch die Auswahl

einer geeigneten Route und die Zuweisung einer Wellenlänge gekennzeichnet. Mit den Bedarfsgleichungen wird ausgedrückt, dass die Anzahl aller auf den Routen genutzten Wellenlängen den Bedarf an optischen Pfaden decken muss. Im WP-Fall legen sie auch die Zuordnung von Wellenlänge und Route fest. Die Kapazitätsrandbedingung besagt im VWP-Fall, dass die Menge optischer Pfade, die den Link l nutzen, das Produkt aus Anzahl von Glasfasern und auf den Glasfasern etablierten Wellenlängen auf diesem Link nicht überschreiten darf. Im WP-Fall wird diese Bedingung auf die Verwendung einer bestimmten Wellenlänge eingeschränkt, die nur so oft verwendet werden darf, wie es der Anzahl y_l von Glasfasern auf dem Link l entspricht. Das Minimum der Zielfunktion minimiert die Summe aller benötigten Glasfasern im Netz.

8.9 Behandlung von Netzausfällen

Bisher haben wir die Netze so betrachtet, wie sie „im Normalfall“ funktionieren sollen. Dieser Normalfall wird in der Praxis aber immer wieder durch Ausfälle von Knoten oder Ausfälle von Links unterbrochen. Vorzugsweise sollten die Kunden gar nichts (oder doch: möglichst wenig) von einem solchen Ausfall mitbekommen. Das bedeutet aber, dass auch unter den Bedingungen eines Ausfalls noch genug Ressourcen vorhanden sein müssen, um den aktuellen Verkehr zu bewältigen. In der Praxis ist die Unterscheidung wichtig, ob Ersatzwege für bestimmte Ausfälle vorgeplant sind und auf sie automatisch umgeschaltet werden kann (protection) oder ob im Fehlerfall ein neuer Weg gesucht werden muss (restoration). Für die Planungsaufgabe werden wir diesen Aspekt außer Acht lassen und uns auf die Frage beschränken, ob ausreichende Kapazitäten zur Verfügung stehen. Im folgenden Problembeispiel beschränken wir uns auf den Fall der Pfadsicherung (Wegesicherung, Routensicherung) im Gegensatz zur Linksicherung. Beide Konzepte sind in Abb. 2.3 dargestellt. Die Linksicherung schaltet um auf einen oder mehrere Alternativwege zwischen den Endpunkten eines ausgefallenen Links und löst damit die Probleme aller Verkehrsströme, die diesen Link nutzten. Die Pfadsicherung schafft für jeden betroffenen Verkehrsstrom einen individuellen Ersatzpfad gleicher Kapazität und ist demgemäß nicht

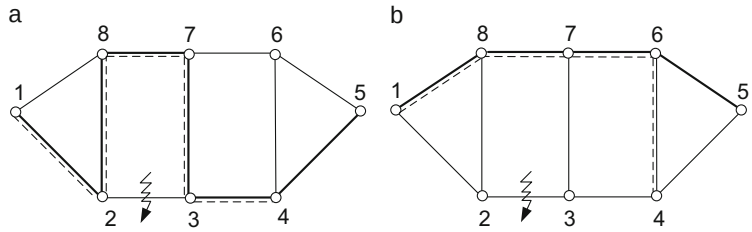

Abb. 8.2 Ersatzwegschaltung für die Verbindungen 1–2–3–4–5 (gezogen) und 1–2–3–4 (gestrichelt): a Linksicherung, b Pfadsicherung

trachteten Bedarfe als reellwertige oder ganzzahlige Größen zu betrachten sind, d. h. inwieweit man Bedarfe in standardisierten Übertragungssystemen und deren Kapazitäten ausdrücken muss. Im nachfolgenden Beispiel betrachten wir reellwertige Flüsse f^m in der Schicht $(n+1)$, die mit Modulen der Kapazität C_M auf den Links l des Netzes $(n+1)$ abgedeckt werden sollen. Die entsprechend benötigten Anzahlen von Modulen C_M auf jedem Link l, y_l, repräsentieren die Bedarfe auf der Schicht (n) und werden dort auf mehreren Wegen p befriedigt. Die Kapazität auf einem der Links der Schicht (n) ist durch $y_e \cdot C_M$ beschränkt. Das Problem einer Zwei-Schicht-Optimierung lässt sich mit gedoppelten Bedarfs- und Kapazitätsrandbedingungen dann wie folgt beschreiben:

Problem 2.7: Zwei-Schicht-Optimierung

$$
\begin{aligned}
&\text{Minimiere:} && \sum_{l=1}^{L} \kappa_l y_l + \breve{\kappa} \cdot \sum_{l=1}^{L} \sum_{p=1}^{P} \kappa_{lp} z_p^l : \\
&\text{Bedarfsrandbedingung } (n+1): && \sum_{r=1}^{R_m} x_r^m = 1 ; \qquad \forall m : \\
&\text{Kapazitätsrandbedingung } (n+1): && \sum_{m=1}^{M} \sum_{r=1}^{R_m} f^m \iota_{lr}^m x_r^m \le C_M y_l ; \qquad \forall l : \\
&\text{Bedarfsrandbedingung } (n): && \sum_{p} z_p^l = y_l ; \qquad \forall l : \\
&\text{Kapazitätsrandbedingung } (n): && \sum_{l} \sum_{p} \iota_{ep}^l z_p^l \le y_e ; \qquad \forall e :
\end{aligned}
\tag{2.7}
$$

In der Kapazitätsrandbedingung der $(n+1)$-Schicht ist die Kapazität des Links nunmehr in Vielfachen (y_l) einer Modulkapazität C_M gegeben. Entsprechend sind auch die z_p^l in Vielfachen dieser Einheit angegeben: z_p^l gibt die Anzahl von Modulen an, die über den Weg p im Netz (n) geroutet werden und damit einen Beitrag zu Realisierung des Bedarfs y_l leisten. Betrachtet man in der letzten Gleichung alle Bedarfe, die mit den Links l verknüpft sind und über die Kante e des Netzes (n) geroutet werden, so darf hier wiederum die in Einheiten von C_M angegebene Kapazitätsgrenze y_e nicht überschritten werden.

Die Zielfunktion betrachtet die mit der Einrichtung eines Übertragungsmoduls im Netz $(n+1)$ einhergehenden Schnittstellenkosten κ_l sowie auch die mit dem Routing der Module des Links l aus Netz $(n+1)$ über den Weg p im Netz (n) verbundenen Kosten κ_{lp} und will deren Gesamtsumme minimieren. Man sieht in dieser Zielfunktion ein Beispiel für das Auftreten von Investitionskosten κ_l sowie von Wartungskosten κ_{lp}, die man mit der Konstanten $\breve{\kappa}$ noch unterschiedlich gewichten kann.

Literatur

1. M. Pioro, and D. Medhi: „Routing, Flow and Capacity Design in Communication and Computer Networks“, Morgan Kaufmann Publishers (2004)
2. ITU-T G.707/Y.1322: Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH) (2007)
3. Open Shortest Path First Version 2, RFC 2328 (1998)
4. ISO 10589, RFC 1195: Use of OSI IS-IS for Routing in TCP/IP and Dual Environments (1990)
5. RFC3031 Multiprotocol Label Switching Architecture (2001), RFC3945 Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture (2004)

http://www.springer.com/978-3-8348-2530-8

Entwurf und Analyse von Kommunikationsnetzen
Netzplanung – Wartesysteme – Network Calculus
Killat, U.
2015, XIII, 303 S. 119 Abb. Mit 27 Beispielen und 58 Übungsaufgaben., Softcover
ISBN: 978-3-8348-2530-8