

Zusammenfassung - BWL: Prduktion, Logistik und Wirtschaftsinformatik

Julian Shen

14. April 2023

1 Einführung in die Logistik und SCM

Logistik:

- **Definition:**
 - Planung, Implementierung und Kontrolle
 - von effizienten, effektiven Vor- und Rückflüssen
 - sowie der Lagerung von Gütern, Dienstleistungen und Informationen
 - zwischen Ursprungs- und Verbrauchsort
 - mit dem Ziel, die Kundenanforderungen zu erfüllen
- **Aufgabe der Logistik** ist es,
 - den Kunden mit dem richtigen Produkt, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit,
 - unter gleichzeitiger Optimierung eines vorgegebenen Leistungskriteriums (z. B. Minimierung der Gesamtkosten),
 - und unter Berücksichtigung gegebener Anforderungen (z. B. Servicegrad) und Beschränkungen (z. B. Budget) zu versorgen
- **7 R's der Logistik:**
 - Richtiges Produkt
 - Richtige Zeit
 - Richtiger Ort
 - Richtige Menge
 - Richtige Qualität
 - Richtige Kosten
 - Richtige Information

Supply Chain:

- Komplexes, unternehmensübergreifendes, interlogistisches System, das die Vorgänge und Funktionen der Beschaffung, Produktion, Verarbeitung, Lagerung und Distribution von Objekten umfasst
- Keine einfache Kette, sondern ein komplexes Netzwerk mit sich verzweigenden und zusammenführenden Informations- und Materialflüssen

Supply Chain Management (SCM):

- Koordination und Kollaboration von Stakeholdern entlang der gesamten Supply Chain, d.h. auch über die eigene Organisation hinaus, insbesondere mit Zulieferern, Zwischenhändlern, Service-Dienstleistern und Kunden
- Umfasst alle Aktivitäten des Logistik Management sowie Produktionsaktivitäten, Vertrieb, Produktdesign, Finanzen und IT

Supply Chain Network:



- **Quellen**, Lieferanten, Auslieferer stellen Objekte zur Verfügung, z.B. Rohstofflager, Produktionsanlagen, Fabriken, Vorratslager, Importlager, Logistikzentren
- **Senken** oder Anlieferstellen haben Nachfragen nach Objekten, z.B. Einzelhändler, Märkte, Filialen, Konsumenten, Müllverbrennungsanlagen
- Warenquellen können selbst Empfänger von Gütern aus anderen Quellen sein
- Handel und Konsumenten sind wiederum Quellen von Leergut, Restoffen und Verpackungsabfall, die entsorgt werden müssen → **Reverse Logistics**

Planungsebenen des Supply Chain Managements:

- **Strategisch – Supply Chain Configuration:**
 - Entscheidungen mit langfristigem Effekt und hohem Kapitalaufwand
 - Planungszeitraum: mehrere Jahre
 - Daten: aggregiert, basieren auf Vorhersagen, oft unvollständig oder ungenau
 - **Beispiele:** Anzahl, Standorte und Kapazitäten von Einrichtungen, Investitionen in Produktions- und Lageranlagen, Layout von Einrichtungen

- **Taktisch – Supply Chain Planning:**

- Entscheidungen, die die effektive Allokation von Produktions- und Distributionsressourcen betreffen
- Planungszeitraum: 3 Monate bis 1 Jahr
- Daten: detailliert, basieren auf Vorhersagen
- **Beispiele:** Beschaffungs- und Produktionsentscheidungen, Wahl von Transport- und Versandstrategien, Lagerbestandsplanung

- **Operativ – Supply Chain Execution:**

- Erstellt zeit- und mengengenaue unmittelbar umsetzbare Vorgaben für die Ausführung der Prozesse
- Planungszeitraum: täglich, wöchentlich
- Daten: sehr konkret, detailliert, bis auf unvorhergesehene Störungen vollständig aus ERP System bekannt
- **Beispiele:** Scheduling (Produktion), Zuweisung von Aufträgen zu Maschinen, Auftragsverarbeitung, Fahrzeug-Routing, LKW-Beladung



Aggregationsebene: Wie detailliert sind die Daten

Logistik vs. SCM:

- **Logistik:** Betrachtung der Material- und Erzeugnisflüsse unter Berücksichtigung von Informations- und Wertströmen innerhalb der eigenen Organisation
- **SCM:** Gesamtes logistisches Wertschöpfungsnetz mit Lieferanten, Produzenten, Händlern, Konsumenten

Koordination und Kollaboration von Stakeholdern entlang der gesamten Supply Chain, auch über die eigene Organisation hinaus

Operations Research:

- Analysiert praxisnahe, komplexe Problemstellungen, um möglichst gute Entscheidungen zu treffen
- Probleme werden mithilfe mathematischer Modelle formuliert und mit mathematischen Lösungsmethoden gelöst
- Anwendbar auf verschiedenste Probleme in Logistik und SCM

Vorgehen beim Lösen von Problemen mit OR:

- Überführe realwirtschaftliches Logistikproblem in abstraktes, logistisches Modell
- Wandle logistisches Modell in OR-Modell (LP/MILP/MIP) um und löse mit bekannten Werkzeugen
- Interpretation der OR-Modell-Lösung und Schlussfolgerung für das reale Problem



- *Beispiel siehe Logistik VL 1, F27-34*
- *Rechenbeispiele siehe Logistik Tutblatt 1*

Wichtige Software für die Logistik:

- **Enterprise Resource Planning Systeme (ERP)** erfassen Daten aller wesentlichen Geschäftsfunktionen (z.B. Buchhaltung, Personalwesen) konsistent und up-to-date und machen diese unternehmensweit verfügbar (z.B. SAP, Oracle)
- Erweiterung zu **Advanced Planning Systems (APS)** helfen, komplexe Planungsaufgaben im SCM zu erfüllen und rationale Entscheidungen zu unterstützen
- APS nehmen die im ERP-System erhobenen Daten in Modelle entgegen und lösen die so entstandenen Probleme mittels OR-Algorithmen

2 Scheduling

Was ist Scheduling?

- Zuordnung von Aufträgen (**Jobs**) zu Arbeitsträgern, z.B. Maschinen, unter Beachtung von Nebenbedingungen zum Optimieren einer oder mehrerer Zielgrößen

Scheduling Notation:

- n **Jobs** müssen auf m **Maschinen** bearbeitet werden
- Job j hat auf Maschine i eine **Prozesszeit** p_{ij}
- Job j kann ein **Gewicht** w_j haben \rightarrow Repräsentiert die Wichtigkeit des Jobs
- Job j kann einen **Liefertermin** d_j haben
- Notation eines **Scheduling-Problems**: $\alpha \mid \beta \mid \gamma$
 - α : Maschinenumgebung
 - β : Auftragscharakteristik und Beschränkungen
 - γ : Zielgröße

Performanz-Kenngrößen:

- **Fertigstellungszeitpunkt (Completion Time) C_j** :
 - Zeitpunkt, zu welchem Job j fertiggestellt ist
 - Bei mehreren Maschinen C_{ij} (Fertigstellung von Job j auf Maschine i) gilt:
$$C_j = \max_{i \in I} \{C_{ij}\}$$
- **Unpünktlichkeit (Lateness) $L_j = C_j - d_j$** beschreibt die Abweichung vom Fertigstellungszeitpunkt zum Liefertermin. Negativ, wenn Produkt zu früh fertig
- **Verspätung (Tardiness) $T_j = \max\{C_j - d_j, 0\}$** wie Lateness, aber erlaubt keine negativen Werte
- **Einheits-Strafe (Unit penalty) $U_j = \begin{cases} 1, & \text{wenn } C_j > d_j \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$**
erhebt eine Einheitsstrafe, wenn Fertigstellungszeitpunkt zu spät

Maschinenumgebung (α):

- **Einzel Maschine (1)**
- **Parallele Maschinen (Pm, Qm, Rm):**
 - Mehrere Maschinen, die gleichzeitig Jobs abarbeiten
 - Pm : m identische Maschinen (gleiche Geschwindigkeit)
 - Qm : m Maschinen mit unterschiedl., job-unspezifischen Geschwindigkeiten
 - Rm : m Maschinen mit unterschiedl., job-spezifischen Geschwindigkeiten
- **Flow-Shop (Fm):** m Maschinen in Serie, alle Jobs müssen diese durchlaufen (selbe Maschinen-Reihenfolge)

- **Job-Shop (Jm):** m Maschinen, alle Jobs müssen diese durchlaufen, haben jedoch unterschiedliche Maschinen-Reihenfolge

Auftragscharakteristik (β):

- **Freigabezeiten (Release dates) (r_j):** Auftrag kann nicht vor diesem Zeitpunkt gestartet werden
- **Unterbrechungen (Preemptions) ($prmp$):** Bearbeitung eines Auftrags kann unterbrochen und später fortgesetzt werden
- **Permutation ($prmu$):** Job-Reihenfolge auf der ersten Maschine muss beibehalten werden
- **Rüstzeiten (Setup times) (s_{jk}, s_{jk}^i):**
 - Bevor mit Auftrag k begonnen werden kann, ist Maschine i durch Umrüstung blockiert
 - s_{jk} : Rüstzeit ist nur von den aufeinanderfolgenden Jobs j und k abhängig
 - s_{jk}^i : Rüstzeit ist zusätzlich von Maschine i abhängig

Zielfunktion (γ):

- **Makespan (C_{max}):** Entspricht Gesamtproduktionszeit, also der Zeit, wenn der letzte Job fertiggestellt ist: $C_{max} = \max_{j \in J} \{C_j\}$
- **Gesamtfertigstellungszeiten (Total completion time) ($\sum C_j$):** Summe der Fertigstellungszeiten der Jobs
- **Gewichtete Gesamtfertigstellungszeiten (Total weighted completion time) ($\sum w_j C_j$):** Summe der gewichteten Fertigstellungszeiten der Jobs
- **Gesamtverspätung (Total tardiness) ($\sum T_j$):** Summe der Verspätungszeiten
- **Anzahl verspäteter Jobs (Number of tardy Jobs) ($\sum U_j$):** Summe der Einheitsstrafen

Gantt-Charts:

- Visualisierungsmöglichkeit von Scheduling-Lösungen
- Block für die Bearbeitung von Job j auf Maschine i ist auf Höhe von i und Länge des Blocks entspricht Prozesszeit p_{ij}
- Innerhalb des Blocks steht die Job-Nummer oder Prozesszeit (problemabhängig)



2.1 Ein-Maschinen-Probleme

- **Problemstellung:** n Jobs sollen auf einer Maschine in Reihenfolge gebracht werden
- Jeder Schedule kann als Permutation der Jobs $1, \dots, n$ angesehen werden
→ $n!$ verschiedene Schedules

Minimierung der Fertigstellungszeiten:

- Problem 1 || C_{max} ist trivial, da $C_{max} = \sum_{j=1}^n p_j$ für jeden Schedule
- Problem 1 || $\sum_{j=1}^n C_j$ lässt sich mit **SPT-Regel** (Shortest Processing Time first) optimal lösen → Individuelle Fertigstellungszeitpunkte so gering wie möglich halten

Job	1	2	3	4
p_j	6	3	9	4

→

Job	2	4	1	3
p_j	3	4	6	9
C_j	3	7	13	22

→ $\sum_{j=1}^n C_j = 45$

Minimierung gewichteter Fertigstellungszeiten:

- Problem 1 || $\sum_{j=1}^n w_j C_j$ lässt sich mit **WSPT-Regel** (Weighted shortest processing time) optimal lösen

Job	1	2	3	4	5	6	7	8
p_j	8	6	5	9	4	5	4	7
w_j	2	3	1	3	0,5	5	2	1
p_j/w_j	4	2	5	3	8	1	2	7

- Ergebnis: $S = \{6, 2, 7, 4, 1, 3, 8, 5\}$ mit $\sum_{j=1}^n w_j C_j(S) = 329$

Minimierung der Anzahl verspäteter Jobs:

- Problem 1 || $\sum_{j=1}^n U_j$ lässt sich mit **Moore's Algorithmus** optimal lösen

1. **Initialisierung:** Sortiere alle Jobs in aufsteigender Reihenfolge nach Lieferterminen \rightarrow Schedule S und setze $J = \emptyset$
2. **Job-Auswahl:**
 - Wenn ein verspäteter Job in S existiert \rightarrow Betrachte ersten verspäteten Job j' in S
 - Sonst: Gehe zu 4.
3. **Job-Entfernung:** Wähle Job u mit größter Prozesszeit, der vor j' kommt und setze $S := S \setminus \{u\}$ und $J := J \cup \{u\}$
4. **Terminierung:** Füge Jobs aus J in beliebiger Reihenfolge an S

Job	1	2	3	4	5	6	7	8
p_j	8	6	5	7	4	8	4	7
d_j	13	12	15	24	20	19	30	40

EDD-Regel

Job	2	1	3	6	5	4	7	8
p_j	6	8	5	8	4	7	4	7
d_j	12	13	15	19	20	24	30	40

Entfernen von Job 1, da $p_1 > p_2$

Jod-ID	2	1	3	6	5	4	7	8	J
C_j in ZE	6	14							\emptyset
C_j in ZE	6	*							{1}
C_j in ZE	6	*	11	19	23				{1}
C_j in ZE	6	*	11	*	15				{1, 6}
C_j in ZE	6	*	11	*	15	22	26	33	{1, 6}

Entfernen von Job 6, da größtes p_j unter platzierten Jobs

- Ergebnis: $S = \{2, 3, 5, 4, 7, 8, 1, 6\}$ oder $S = \{2, 3, 5, 4, 7, 8, 6, 1\}$ mit $\sum_{j=1}^n U_j(S) = 2$

2.2 Flow-Shop-Umgebung

- **Problemstellung:** n Jobs durchlaufen selbe Maschinensequenz mit m Maschinen. Reihenfolge der Jobabarbeitung kann an jeder Maschine variieren
- Unterscheidung nach **Buffer-Typen:**
 - **Unbegrenzter Zwischenspeicher:** Keine Blockierung vorhergehender Maschinen möglich (*im Folgenden angenommen*)
 - **Begrenzter Zwischenspeicher:** Blockierung vorhergehender Maschinen möglich, d.h. wenn Produkt auf Maschine 1 fertig ist, dann kann es nicht direkt auf Maschine 2 geschoben werden und blockiert somit Maschine 1
- Schedule heißt **Permutationsschedule**, wenn Jobs in gleicher Reihenfolge auf allen Maschinen abgearbeitet werden

Minimierung des Makespan:

- Problem $Fm \parallel C_{max}$, wobei m die Anzahl der Maschinen ist
- **Satz:** Für $Fm \parallel C_{max}$ existiert für jede Probleminstance ein optimaler Schedule, bei welchem die Jobsequenz für die ersten zwei Maschinen für die letzten zwei Maschinen gleich ist
- **Folgerung:** Für $F2 \parallel C_{max}$ und $F3 \parallel C_{max}$ existieren optimale Schedules die Permutationsschedules sind
- Für **Permutationsschedules** gilt:
 - $C_{i,j_1} = \sum_{l=1}^i p_{l,j_1}$ für $i = 1, \dots, m$: Fertigstellungszeitpunkt von Job 1 auf Maschine i ist die Summe der Prozesszeiten von Job 1 auf allen vorherigen Maschinen
 - $C_{1,j_k} = \sum_{l=1}^k p_{1,j_l}$ für $k = 1, \dots, n$: Fertigstellungszeitpunkt von Job k auf Maschine 1 ist die Summe der Prozesszeiten von allen vorherigen Jobs auf Maschine 1
 - $C_{i,j_k} = \max\{C_{i-1,j_k}, C_{i,j_{k-1}}\} + p_{i,j_k}$ für $i = 2, \dots, m$ und $k = 2, \dots, n$: Erst, wenn Job k auf vorheriger Maschine $i-1$ fertig ist und wenn Job $k-1$ auf Maschine i fertig ist, kann mit Job k auf Maschine i angefangen werden
- $F2 \parallel C_{max}$ lässt sich mit **Johnson's Algorithmus** optimal lösen:
 1. **Initialisierung:** Speichere Jobs mit $p_{1,j} \leq p_{2,j}$ in J_1 und Jobs mit $p_{1,j} > p_{2,j}$ in J_2
 2. **Job-Sortierung:** Sortiere Jobs in J_1 aufsteigend nach Prozesszeiten auf Maschine 1 und Jobs in J_2 absteigend nach Prozesszeiten auf Maschine 2
 3. **Terminierung:** Füge J_2 an J_1

■ Beispiel

- Initialisierung: $J_1 = [1,4], J_2 = [2,3,5]$
- Job-Sortierung: $J_1 = [1,4], J_2 = [3,5,2]$
- Terminierung: $S = \{1,4,3,5,2\}, C_{max} = 30$

j	$p_{1,j}$	$p_{2,j}$
1	1	4
2	4	2
3	8	6
4	6	6
5	8	5



Betrachtung der Komplexität:


- $F2 \parallel C_{max}$ lässt sich mit Johnson's Algorithmus in polynomialer Zeit lösen

- $Fm \parallel C_{max}$ für $m \geq 3$ ist NP-schwer \rightarrow Lösung durch Heuristiken

Johnson's Algorithmus für 3 Maschinen:

- Für bestimmte Probleminstanzen von $F3 \parallel C_{max}$ findet eine modifizierte Form von Johnson's Algorithmus ebenfalls eine optimale Lösung
- **Voraussetzung:** $\max_{i \in J} \{p_{2i}\} \leq \min_{k \in J} \{p_{1k}\}$ oder $\max_{i \in J} \{p_{2i}\} \leq \min_{k \in J} \{p_{3k}\}$ mit $i \neq k$
- **Vorgehen:**
 1. Berechne $p_{1j}^* = p_{1j} + p_{2j}$ und $p_{2j}^* = p_{2j} + p_{3j}$ für alle $j \in J$
 2. Führe den normalen Johnson Algorithmus für p_{1j}^* und p_{2j}^* durch

Job-ID	1	2	3	4
p_{1j}	8	9	3	10
p_{2j}	6	3	4	2
p_{3j}	10	8	6	7



Job-ID	1	2	3	4
p_{1j}^*	14	12	7	12
p_{2j}^*	16	11	10	9

Job-ID	3	1	2	4
p_{1j}	3	8	9	10
p_{2j}	4	6	3	2
p_{3j}	6	10	8	7
C_{1j}	3	11	20	30
C_{2j}	7	17	23	32
C_{3j}	13	27	35	42

- Initialisierung: $J_1 = [1,3], J_2 = [2,4]$
- Job-Sortierung: $J_1 = [3,1], J_2 = [2,4]$
- Terminierung: $S = \{3,1,2,4\}, C_{max} = 42$
- Optimal? \rightarrow Ja, denn $\max_{j \in J} \{p_{2j}\} = 6 \leq \min_{j \in J} \{p_{3j}\} = 6$

- Einträge C_{ij} wird nach den Rechenvorschriften für Permutationsschedules (*siehe vorherige Seite*) bestimmt

Heuristiken:

- Verfahren zur Bestimmung eines zulässigen Punktes eines Problems, dessen Wert möglichst nahe am Optimalwert liegen soll, mit akzeptablem Aufwand
- **Arten von Heuristiken:**
 - **Konstruktionsheuristiken:** Finden eines ersten zulässigen Punktes
 - **Verbesserungsheuristiken:** Ausgehend von einem zulässigen Punkt wird nach Verbesserungen gesucht
 - Heuristiken zur Bestimmung von Schranken

NEH-Heuristik:

1. Berechne für jeden Job j : $T_j = \sum_{i=1}^m p_{ij}$
2. Sortiere Jobs in absteigender Reihenfolge ihrer T_j in einer Liste, wenn mehrere Jobs dieselben Werte für T_j haben, sortiere aufsteigend nach Job-IDs

3. Nehme die ersten beiden Jobs der Liste und finde die beste Sequenz aus diesen Jobs \rightarrow Berechne Makespan für beide möglichen Sequenzen und wähle Sequenz mit niedrigerem Makespan. Setze $i := 3$
4. Nehme Job an i -te Stelle aus der Liste von Schritt 2. Füge diesen an alle möglichen Positionen der bisher generierten Sequenz ein. Die generierte Sequenz, welche den minimalen Makespan aufweist, wird für den nächsten Schritt berücksichtigt.
5. Wenn $i = n \rightarrow$ Stop, sonst $i = i + 1$ und gehe zu Schritt 4

Beispiel siehe Übung, Folie 14-18

MILP für Flow-Shop Maschinenumgebung (allgemein):

- **Entscheidungsvariablen:**

- x_{jk}^i : Binärvariable: Angabe, ob j vor k auf i produziert wird
- C_{ij} : Fertigstellungszeitpunkt von j auf Maschine i

- **Zielfunktion:** $Z \rightarrow \min$ mit $Z = \max_{j=1,\dots,n} \{C_{mj}\}$ (Minimierung Makespan)

- **Nebenbedingungen:**

1. $C_{ij} \geq C_{(i-1)j} + p_{ij}, \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ (Maschinenreihenfolgensicherstellung)
 2. $M \cdot x_{jk}^i + C_{ij} - C_{ik} \geq p_{ij}, \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n-1; k = j+1, \dots, n$ (Jobreihenfolge, wenn k vor j)
 3. $M \cdot (1 - x_{jk}^i) + C_{ik} - C_{ij} \geq p_{ik}, \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n-1; k = j+1, \dots, n$ (Jobreihenfolge, wenn j vor k)
 4. $Z \geq C_{mj}, \quad \forall j = 1, \dots, n$ (Definition Makespan Z)
 5. $C_{0j} = 0, \forall j = 1, \dots, n$ (NNB für virtuelle Maschine 0 \rightarrow Job j kann erst ab Zeitpunkt 0 auf Maschine 1 produziert werden)
 6. $x_{jk}^i \in \{0; 1\} : x_{jk}^i = \begin{cases} 1, & \text{wenn Auftrag } j \text{ vor Auftrag } k \text{ auf Maschine } i \text{ produziert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
- M ausreichend groß wählen \rightarrow Sorgt für Erfüllung der Ungleichungen, wenn j vor k (2.) oder k vor j (3.) bearbeitet wird
 - Bei anderer Zielfunktion $\rightarrow Z$ austauschen und 4. eventuell streichen

MILP für Permutation-Flow-Shop:

- **Entscheidungsvariablen:**

- x_{jk} : Binärvariable: Angabe, ob j an Position k (auf allen Maschinen) produziert wird

- C_{ik} : Fertigstellungszeitpunkt des Jobs auf Position k auf Maschine i
- **Zielfunktion:** $Z \rightarrow \min$ mit $Z = \max_{j=1, \dots, n} \{C_{mj}\}$ (Minimierung Makespan)
- **Nebenbedingungen:**
 1. $\sum_{j=1}^n x_{jk} = 1, \forall k = 1, \dots, n$ (Jede Position hat einen Job)
 2. $\sum_{k=1}^n x_{jk} = 1, \forall j = 1, \dots, n$ (Jeder Job hat eine Position)
 3. $C_{(i-1)k} + \sum_{j=1}^n p_{ij}x_{jk} \leq C_{ik}, \forall i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ (Maschinenreihenfolgensicherstellung)
 4. $C_{i(k-1)} + \sum_{j=1}^n p_{ij}x_{jk} \leq C_{ik}, \forall i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, n$ (Jobreihenfolgensicherstellung)
 5. $Z \geq C_{mj}, \quad \forall j = 1, \dots, n$ (Definition Makespan Z)
 6. $C_{01} = 0$ (NNB für die virtuelle Maschine 0 \rightarrow Job auf Position 1 kann erst ab Zeitpunkt 0 auf erster Maschine produziert werden)
 7. $x_{jk} \in \{0; 1\} : x_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Auftrag } j \text{ an Position } k \text{ produziert wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
- Bei anderer Zielfunktion $\rightarrow Z$ austauschen und 5. eventuell streichen

Flow-Shop-Optimierung durch Solver:

- Obige MILPS können durch Solver (z.B. CPLEX) gelöst werden
- Große einfache Probleme \rightarrow Nutze Heuristiken, da diese schneller
- Schwere Probleme \rightarrow Nutze Solver

3 Layoutplanung

Aufgabe:

- Räumlichen Anordnung von **Anordnungsobjekten (AO)** in einer Einrichtung zur Güterproduktion oder Serviceerbringung
- Anordnung erfolgt auf Basis der Einrichtungsprämissen und so, dass eine gegebene Zielgröße optimiert wird
- **Beispiel:** Anordnung der Krankenhausräume zur Minimierung der Patientenwege

Relevanz von Layoutplanung:

- Layoutplanung beeinflusst die Produktionskapazität, Produktionskosten, Prozessorganisation und Arbeitssicherheit eines Unternehmens
- Umplatzierung ist mit vielen Kosten und Betriebsstopp verbunden
→ Beeinflusst die langfristige Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens

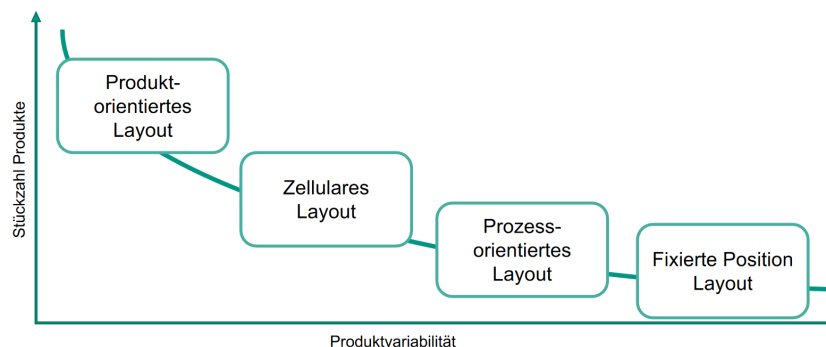
Anlässe für Layoutplanung:

- **Neugestaltung:** Erstmalige Gestaltung eines Layouts
- **Erweiterung:** Zusätzliches AO in existierendes Layout integrieren
- **Umstellung:** Veränderung des bestehenden Layouts → **Demontagekosten**

Anwendungsgebiete von Layoutplanung:

- **Service-System-Layouts:** Direkter Kundenkontakt → Ziel: Wohlbefinden des Kunden (Bsp. Krankenhaus, Verwaltungsstellen, Shops)
- **Produktions-Layouts:** Transportaufwand vieler Güter innerhalb der Produktionsanlage → Ziel: Geringe Transportkosten/-zeiten, Arbeitssicherheit
- **Lagerhaus-Layouts:** Lagerung von Erzeugnissen und Materialien → Ziel: Minimierung Lagerkosten sowie Einlagerungs- und Entnahmezeiten
- **Nicht-traditionelle Layout-Probleme:** Tastaturlayouts

Layouttypen:



- **Produktorientiertes Layout:**
 - AOs sind entsprechend der Fertigungssequenz von Produkten angeordnet, z.B. Fließbandsysteme
 - **Vorteil:** Hohes Produktionsvolumen, geringe Stückkosten
 - **Nachteil:** Geringe Produktvariabilität, geringe Flexibilität für neue Produkte
→ Nachfrage muss stabil bleiben, hohe Kapitalkosten

- **Zellulares Layout:**

- AOs in Subsysteme zusammengefasst, in denen die Produktion stattfindet
- **Vorteil:** Geringere Raumbelugung, Geringere Arbeitskosten, Geringerer Work-in-Process Inventarbedarf
- **Problem:** Intra-Zell-Maschinen-Layout

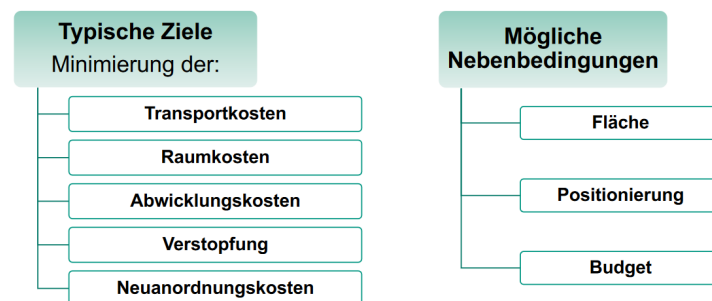
- **Prozessorientiertes Layout:**

- AOs werden einzeln platziert, Produkte werden zwischen AOs transportiert und haben individuelle AO-Reihenfolge → **Ziel:** Minimierung der Transportaufwendungen
- **Vorteil:** Hohe Produktvariabilität, einfaches Integrieren neuer Produkte, geringe Kapitalkosten
- **Nachteile:** Hohe Stückkosten, geringes Produktionsvolumen
- **Typisches Problem:** **Quadratisches Zuordnungsproblem**

- **Fixierte Position Layout:**

- Produkt ist fest platziert, AOs bewegen sich um das Produkt
- **Anwendung:** Große, schwer transportierbare Einzelprodukte, z.B. Werften, Flugzeugfabrik

3.1 Quadratisches Zuordnungsproblem (QZP)



Annahmen des klassischen QZP:

- p gleichgroße AOs müssen auf diese p gleichgroße Positionen platziert werden
- Für alle $k, l = 1, \dots, p$ ist d_{kl} die Distanz von k nach l , es gilt $d_{kk} = 0 \rightarrow$ Distanzmatrix $(D)_{kl}$
- Zwischen den AOs findet Warenaustausch mit Häufigkeit h_{ij} von i nach j statt \rightarrow Häufigkeitsmatrix $(H)_{ij}$
- Ziel: Gesamttransportkosten (abh. von Distanzen und Häufigkeiten) minimieren

Mathematische Formulierung als ganzzahliges Programm:

- **Entscheidungsvariable** $x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{wenn AO } i \text{ an Position } k \text{ zugeordnet ist} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
- **Zielfunktion:** $\sum_{i=1}^p \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^p \sum_{k=1}^p \sum_{\substack{l=1 \\ k \neq l}}^p h_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \rightarrow \min$
- **Nebenbedingungen:**
 - Jedes AO ist exakt einer Position zugeordnet: $\sum_{k=1}^p x_{ik} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, p$
 - Jede Position ist zu genau einem AO zugeordnet: $\sum_{i=1}^p x_{ik} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, p$
 - Binarität der Entscheidungsvariable: $x_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i, k = 1, \dots, p$
- Bei zusätzlicher Distanzsymmetrie ($d_{kl} = d_{lk}$) kann Zielfunktion gekürzt werden:
$$\sum_{i=1}^{p-1} \sum_{j=i+1}^p \sum_{k=1}^p \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^p (h_{ij} + h_{ji}) d_{kl} x_{ik} x_{jl} \rightarrow \min$$

Beispiele siehe Tut 4 und Logistik VL 4, F19-23

3.2 Zweiertauschverfahren

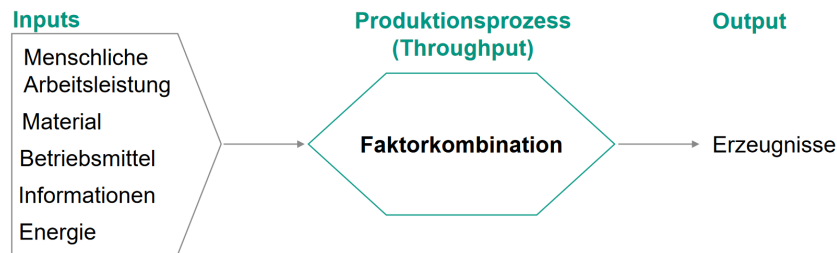
Vorgehen:

1. Ausgang: Layout mit Startlösung gegeben
2. Berechne für alle Paare (k, l) von Standorten den Zielfunktionswert, wenn man die AOs auf den Positionen tauscht
3. Wenn kein niedrigere Zielfunktionswert gefunden: STOP, sonst führe 2. mit der Zuordnung mit dem neuen geringsten Zielfunktionswert aus

Beispiele siehe Logistik VL 4, F32-35

4 Einführung Produktionswirtschaft und Nachhaltigkeit

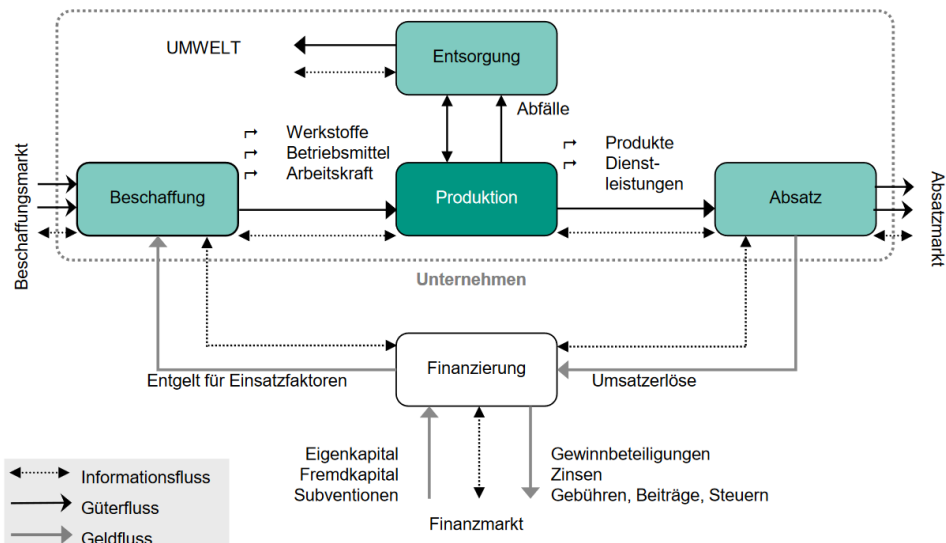
Definition Produktion: Kombination von Gütern (Input, Produktionsfaktoren) zur Erstellung anderer Güter (Output, betriebliche Leistungen)



Produzierendes Gewerbe (sekundärer Sektor, industrieller Sektor) umfasst:

- Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden
- Verarbeitendes Gewerbe
- Energieversorgung und Wasserversorgung
- Baugewerbe
- ca. 25% der Erwerbstätigen und des BIPs in Deutschland

Produktion im Unternehmenskreislauf:



- **Wertschöpfung:** Verkaufswert des Outputs minus Wert für extern bezogene Güter und Dienstleistungen
- **Wertschöpfungskette:** siehe *Supply Chain Definition S.2*

Wichtige Teilgebiete der Produktion:

- **Produktionsplanung:** Systematische Identifikation, Bewertung und Auswahl von Handlungsmöglichkeiten → Optimale Erfüllung der strategischen Vorgaben
- **Produktionssteuerung:** Umsetzung der Produktionspläne im täglichen Produktionsablauf
- **Produktionsmanagement:** Konkretisierung und Umsetzung der strategischen Vorgaben der Unternehmensführung im Bereich der betrieblichen Leistungserstellung

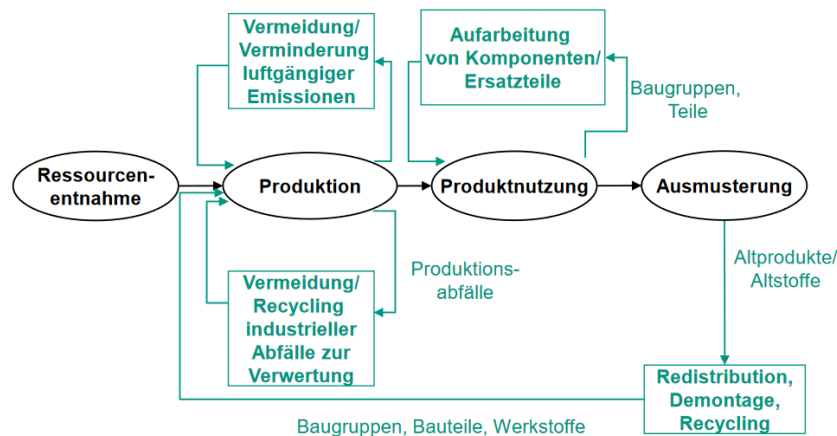
Planungsaufgaben des Produktionsmanagements (s. S.3/4):

- **Strategisches Produktionsmanagement:** Strategien zur Schaffung und Erhaltung einer leistungsfähigen Produktion und Wettbewerbsfähigkeit
- **Taktisches Produktionsmanagement:** Konkretisierung der Strategien, Entscheidungen über Leistungsfelder und Technologien
- **Operatives Produktionsmanagement:** Optimaler Einsatz des vorhandenen Produktionsapparates, z.B. durch Produktionsprogrammplanung, Materialwirtschaft, Ablaufplanung
- *Beispiele siehe Produktion VL 1, F21,23,25,26*

Nachhaltige Produktion:

- **Definition Nachhaltigkeit:** Erfüllung der vorherrschenden Bedürfnisse ohne zukünftige Generationen daran zu hindern ihre Bedürfnisse zu erfüllen
- **Prinzipien:** Intergenerationale und intragenerationale Gerechtigkeit
- **Drei Säulen-Konzept der Nachhaltigkeit:** Ökonomische Sicherheit, Ökologisches Gleichgewicht, Soziale Gerechtigkeit
- **3 P der Nachhaltigkeit:** Prosperity (Profit), Planet, People
- PLE durch **Sustainable Development Goals** (VL1, F34) und **European Green Deal** (VL1, F32) in Richtung Nachhaltigkeit verändert
- **Nachhaltige Wertschöpfungsketten** (VL1, F37-48)

Von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft - Circular Economy:



5 Bestandsmanagement

5.1 Produktionsprogrammplanung

Definition: Produktionsprogrammplanung legt fest in welchen Arten, Mengen und in welcher zeitlichen Verteilung hergestellt wird.

Zeitliche Ebenen der Produktionsprogrammplanung:

- **Strategisch:** Festlegung der Produktfelder
- **Taktisch:** Konkretisierung der Produktfelder, Festlegung der Breite und Tiefe
- **Operativ:** Festlegung der Art und Menge der zu produzierenden Erzeugnisse für die nächste Planungsperiode → **Frage:** Welches Produktionsprogramm maximiert bei gegebenen Kapazitäten und Deckungsbeiträgen pro Produkt den Gesamtdeckungsbeitrag?

Deckungsbeitrag:

- (Gesamt-) Gewinn = Erlös – Kosten = Erlös – (Fixkosten + variable Kosten)
- Stückgewinn = Stückerlös – Stückkosten = Stückerlös – (Fixkosten pro Stück + variable Stückkosten)
- **Deckungsbeitrag** = Stückerlös – variable Stückkosten
- Wenn die Summe aller erzielten Deckungsbeiträge die gesamten Fixkosten abdeckt, wird die **Gewinnschwelle** erreicht

Berechnung des optimalen Produktionsprogramm: siehe Produktion VL 2, F9-15

WICHTIG! → Lösung mit Simplex-Algorithmus (s. *Logistik Tut 1*) oder Eckpunktmethode oder grafisch

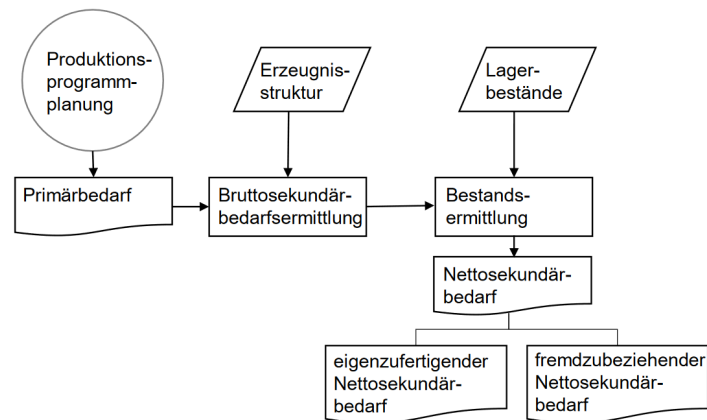
5.2 Bedarfsermittlung

Ziel: Zeitgerechte, exakte Ermittlung der benötigten Güter (und Dienstleistungen), um die Versorgungssicherheit entlang von Wertschöpfungsketten zu gewährleisten

Verfahren der Materialbedarfsermittlung:

- **Produktionsprogrammgesteuerte Bedarfsermittlung:** Programmgebunden, Basierend auf dem aktuellen Produktionsprogramm, Deterministisch
- **Verbrauchsorientierte Bedarfsermittlung:** Verbrauchsgebunden, Basierend auf dem Bedarf in der Vergangenheit oder Prognosen der Zukunft, Stochastisch möglich

Produktionsprogrammgesteuerte Bedarfsermittlung:



Beispiel: Primärbedarf = 5 Fahrräder, Erzeugnisstruktur = Zusammensetzung eines Fahrrads, Bruttosekundärbedarf = z.B. Anzahl Räder, Nettosekundärbedarf = Bruttosekundärbedarf abzüglich den Bauteilen, die im Lager vorhanden sind

Konkrete Berechnung s. Produktion Tut 1

Stücklistenauflösung und Gozinto-Graph:

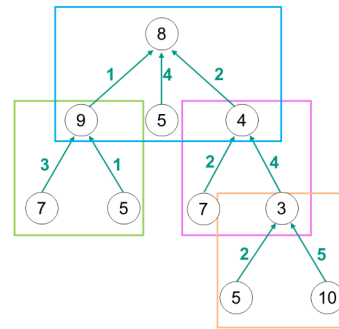
- Beschreibung der Mengenrelationen zwischen Endprodukten, Baugruppen und Einzelteilen
- Unterscheide **mehrteilige Fertigung** (Endprodukt aus unterschiedlichen Teilen) und **mehrstufige Fertigung** (Fertigung über mehrere Stufen)

Endprodukt 8		
Pos. Nr.	Menge	Bezeichnung
9	1	Baugruppe
5	4	Teil
4	2	Baugruppe

Baugruppe 4		
Pos. Nr.	Menge	Bezeichnung
7	2	Teil
3	4	Baugruppe

Baugruppe 9		
Pos. Nr.	Menge	Bezeichnung
7	3	Teil
5	1	Teil

Baugruppe 3		
Pos. Nr.	Menge	Bezeichnung
5	2	Teil
10	5	Teil



Verbrauchsorientierte Bedarfsermittlung: Angewendet, wenn

- Stücklisten nicht vollständig vorhanden sind
- der geringe Materialwert eine programmorientierte Ermittlung nicht rechtfertigt

Prognosen zeichnen sich durch zwei **Fehlerrisiken** aus:

- Vorhersagbarkeit zukünftiger Bedarfe
- Adäquate mathematische Modellierung

Methoden der verbrauchsorientierten Bedarfsermittlung:

Gute Anwendbarkeit:

- Arithmetisches Mittel
- Gleitender Durchschnitt
- Exponentielle Glättung (1. Ordnung)

Komplexe Methoden:

- Exponentielle Glättung (2. Ordnung)
- Zeitreihenmodelle wie z. B. ARIMA

Konkrete Berechnung s. Produktion Tut 1

5.3 Beschaffungsplanung

Funktion: Versorgung der Produktion mit den notwendigen Produktionsfaktoren, insb. dem notwendigen Material

Teilaufgaben:

- **Materialbedarfsermittlung:** Ableitung der notwendigen Materialmengen aus dem Produktionsprogramm
- **Losgrößenplanung:** Bündelung der mit der Materialbedarfsermittlung berechneten Bedarfe bei Eigenerstellung von Vorprodukten zu Produktionslosen (Serien)

- **Lagerhaltung:** Puffer zwischen Beschaffung und Produktion
- **Materialwirtschaft:** Organisation der Materialbeschaffung

Kosten der Beschaffung:

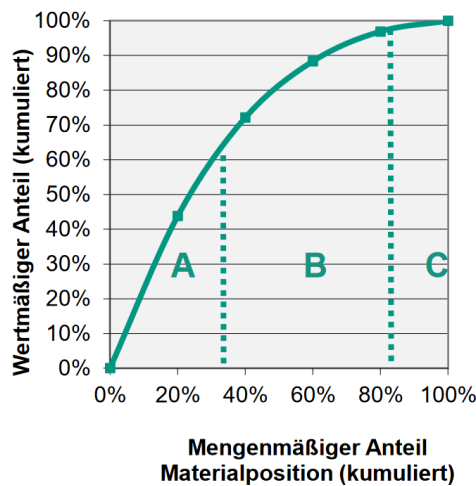
- **Pagatorische Kosten:** Kosten können nur vorliegen, wenn mit ihnen Auszahlungen verbunden sind
- Pagatorische Kosten der Beschaffung:
 - Variable Kosten der beschafften Güter und Dienstleistungen
 - Fixkosten des Lagers
 - Bestellfixe Kosten (unabhängig von der Bestellmenge)
 - Variable Lagerhaltungskosten (Kosten durch Verderb und Schwund)

Beschaffungsarten:

- **Fallweise Beschaffung:**
 - Material wird bei Bedarf beim Lieferanten bestellt
 - **Vorteil:** Vermeidung von Lagerhaltungskosten
 - **Nachteil:** Mögliche Produktionsausfälle bei Lieferschwierigkeiten und hoher Bestellaufwand
- **Vorratsbeschaffung (Lagerhaltung):**
 - Material wird auf Vorrat bestellt und der Fertigung direkt aus dem Lager zur Verfügung gestellt
 - **Vorteil:** Höhere Versorgungssicherheit
 - **Nachteil:** Höhere Lagerhaltungskosten
- **Fertigungssynchrone Beschaffung (Just-in-Time):**
 - Rahmenvertrag über längerfristige Abnahmemenge; Material wird jeweils so zeitnah angeliefert, dass es direkt in der Fertigung eingesetzt werden kann
 - **Vorteil:** Hohe Versorgungssicherheit bei geringen Lagerkosten
 - **Nachteil:** Hoher Planungs-, Abstimmungs- und Transportaufwand

ABC-Analyse zur Materialklassifikation:

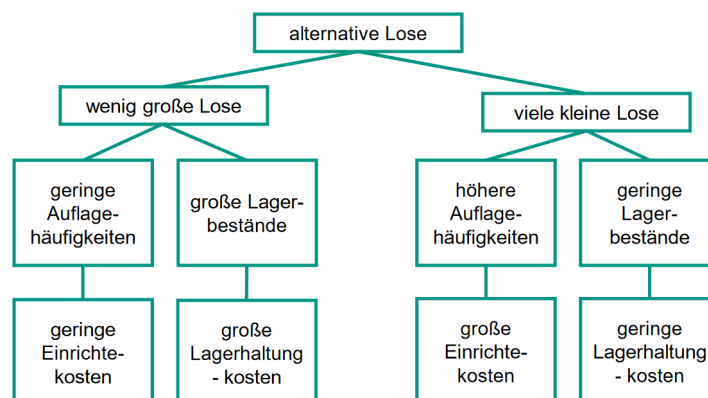
- **Beobachtung:** Relativ kleiner Teil der zu beschaffenden Güterarten macht den Hauptanteil am gesamten Beschaffungswert aus
- Einteilung in A-Güter, B-Güter und C-Güter



- A-Güter:
 - Fertigungssynchrone Beschaffung, wenn Bedarf stetig und Produktion gut planbar
 - Fallweise Beschaffung, wenn Bedarf stark schwankend oder Produktionstypen auftragsbezogen sind
 - Programmgebundene Disposition
- C-Güter sollten auf Vorrat beschafft und eingelagert werden, verbrauchsorientierte Beschaffung
- Beschaffungsart für B-Güter individuell wählen

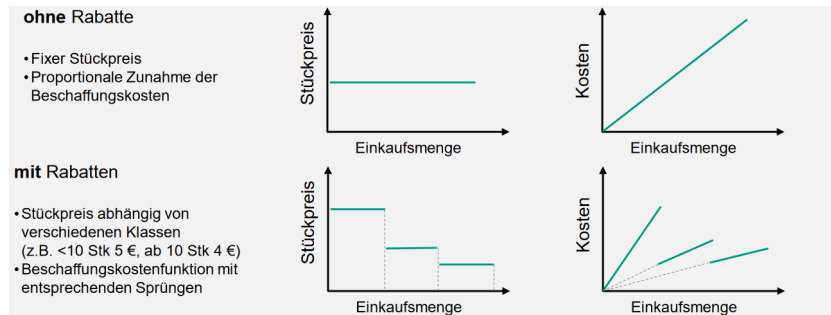
Losgrößenplanung:

- **Definition Losgröße:** Menge identischer Produktkomponenten, die zwischen zwei Umrüstvorgängen auf einer Produktionsanlage ohne Unterbrechung hergestellt wird
- Beispiel: Stelle ich 20 Räder in einem Block oder in 2 Losen je 10 Räder her?
- **Aufgabe:** Ermittlung optimaler Losgrößen, sodass Kosten minimiert werden



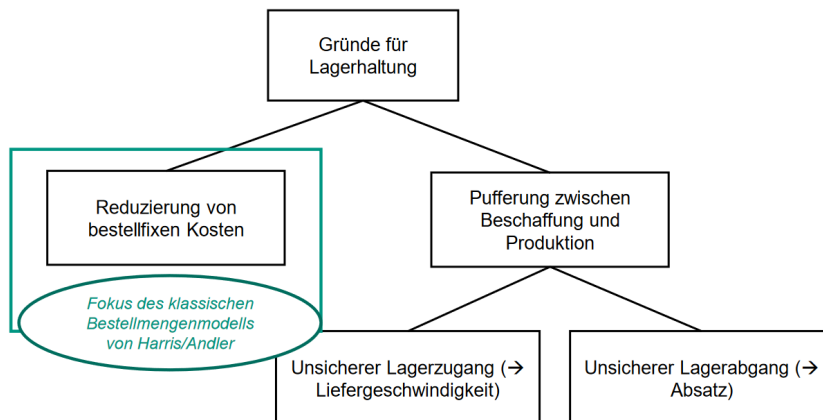
Einteilung der bei Fremdbeschaffung / Eigenfertigung anfallenden Kosten:

- Beschaffungskosten / variable Produktionskosten:



- Bestellkosten / Umrüstkosten: Sind Fixkosten
- Lagerhaltungskosten: Beinhaltet neben eigentlichen Lagerkosten auch **kalkulatorische Zinsen** (Kosten des im Lagerbestand gebundenen Kapitals)
- Fehlmengenkosten: Fallen an, wenn das beschaffte Material nicht ausreicht, um den Bedarf der Fertigung zu decken, z.B. entgangene Gewinne

Lagerhaltung:



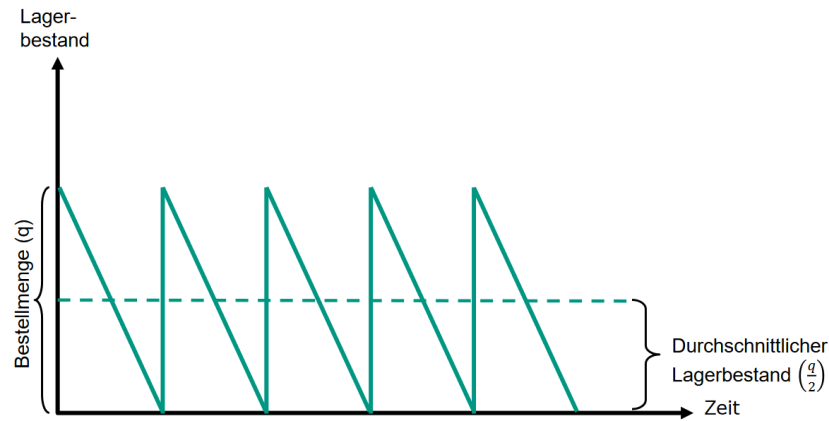
Harris/Andler-Bestellmengenmodell:

Annahmen:

- Nur ein Gut betrachtet
- Beschaffungspreis des Gutes ist unabhängig von der Bestellmenge
- Periodenbedarf ist bekannt
- Keine Lieferfristen
- Lageranfangsbestand ist gleich Null
- Keine Fehlmengen

- Keine Kapazitätsbeschränkungen
- Keine Unteilbarkeiten hinsichtlich Bestellmenge
- Materialverbrauch ist in der Periode konstant / Lagerabgang erfolgt gleichmäßig

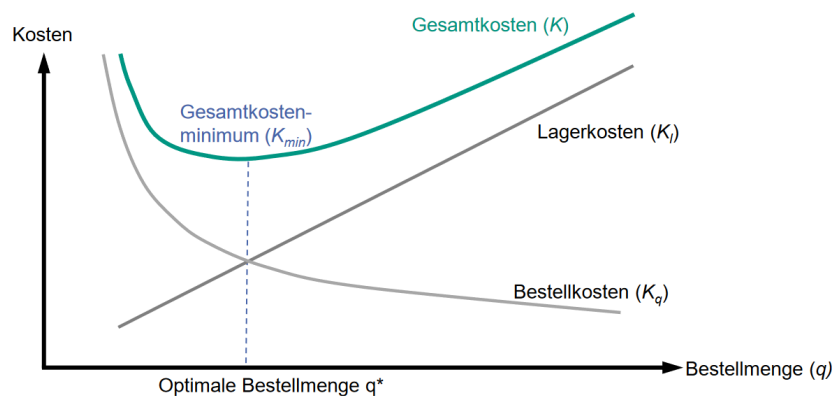
Lagerbestandsentwicklung:



Ziel: Ermittlung der optimalen Bestellmenge q

Elemente:

- Lagerung eines Gutes zum Stückpreis von p mit Jahresbedarf D Stück → **unmittelbare Beschaffungskosten** K_u
- Bestellfixe Kosten K_f für jede Bestellung → **Bestellkosten** K_q
- Lagerkosten in Höhe des Zins- und Lagerkostensatzes h → **Lagerkosten** K_l
- Zahl der Bestellvorgänge pro Jahr: D/q
- **Gesamtkosten:** $K = K_u + K_q + K_l$



Es lässt sich herleiten: $q^* = \sqrt{\frac{2DK_f}{ph}}$

- Beispielrechnungen: *siehe Produktion Tut 2 oder VL 2, F50-52*

Kritik: Starke Annahmen des Modells führt zu Realitätsferne

Unsicherheitsfaktoren für die Lagerhaltung:

- Schwankungen der Nachfrage über die Perioden
- Schwankungen der Wiederbeschaffungszeit
- Schwankungen der Liefermenge
- Ungenauigkeiten der Bestandsführung

→ Berücksichtigung stochastischer Periodenbedarfe durch einen Sicherheitsbestand und in **Lagerhaltungspolitiken**

5.4 Bestandsplanung

Wesentliche Begriffe:

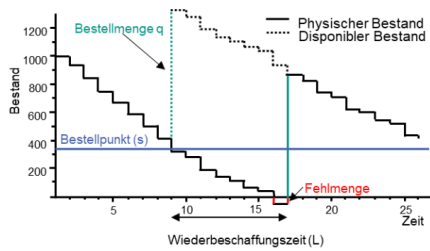
- **Nettobestand:** Im Lager physisch befindlicher Bestand an Ware
- **Fehlbestand/-menge:** Lagerbestand, der wegen mangelnder Lieferfähigkeit nicht ausgeliefert werden konnte
- **Bestellbestand/-menge:** Bestellmengen, die noch nicht physisch im Lager sind (z.B. wegen Transport), aber bereits dem Lager mitgeteilt wurden
- **Disponibler Bestand:** Nettobestand + Bestellbestand – Fehlbestand

Lagerhaltungspolitik:

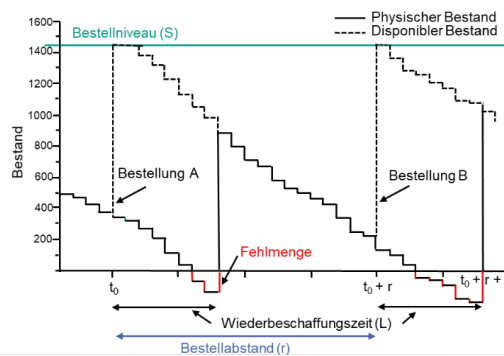
Bestellzeitpunkt	Bestellmenge
r-Politik Bestellung in festen <i>Bestellintervallen</i> von r Zeiteinheiten*	q-Politik Bestellung jeweils einer festen <i>Bestellmenge</i> q
s-Politik Bestellung, falls der disponible Lagerbestand b einen <i>Bestellpunkt</i> s (d.h. Meldebestand) erreicht hat	S-Politik Bestellung jeweils der Differenz zwischen <i>Bestellniveau</i> S und dem disponible Lagerbestand b

Politiken für Bestellmenge und Bestellzeitpunkt können miteinander kombiniert werden
→ (s,q)-Politik, (s,S)-Politik, (r,q)-Politik, (r,S)-Politik

(s,q)-Politik

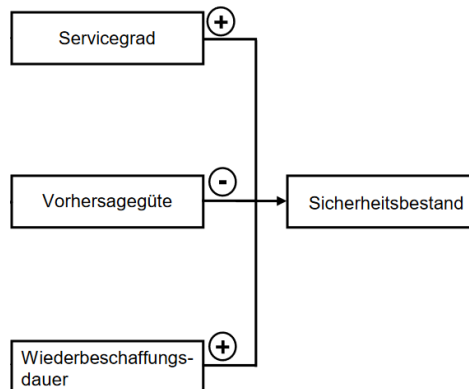


(r,S)-Politik



- **(s,q)-Politik:** Bestellpunkt s muss ausreichend sein, um die Nachfragemenge während der Wiederbeschaffungszeit zu decken → Geringerer Sicherheitsabstand nötig, Keine schwankenden Bestellmengen
- **(r,S)-Politik:** Bestellniveau S muss ausreichend sein, um Bedarf bis zur nächsten Bestellung zu decken → Geringer Überwachungsaufwand, Beschaffungstermine unterschiedlicher Produkte vom selben Lieferanten können aufeinander abgestimmt werden

Sicherheitsbestand: Erwarteter Bestand, der zum Zeitpunkt des Eingangs neuer Waren planmäßig noch im Lager vorhanden ist



Lager-Servicegrade:

- α -Servicegrad: Wahrscheinlichkeit, dass keine Fehlmengen auftreten → Keine Aussagen über Höhe der Fehlmengen
- β -Servicegrad: $\beta = \frac{\text{sofort erfüllbare Nachfragemenge}}{\text{Nachfrage in der Periode}}$

Bullwhip-Effekt: Phänomen, dass sich Nachfrageschwankungen über Lieferketten hinweg verstärken → **Auswirkungen:**

- Ungleichmäßige Kapazitätsauslastungen entlang der Lieferketten

- Hohe Lagerbestände zur Absicherung gegen Schwankungen
- Geringere Servicegrade und Kundenzufriedenheiten

Gegenmaßnahmen:

- Verbesserung des Informationsflusses in der SC
- Kommunikation von möglichen Preisänderungen
- Reduzierung der Wiederbeschaffungszeit
- Reduzierung der Supply Chain Komplexität

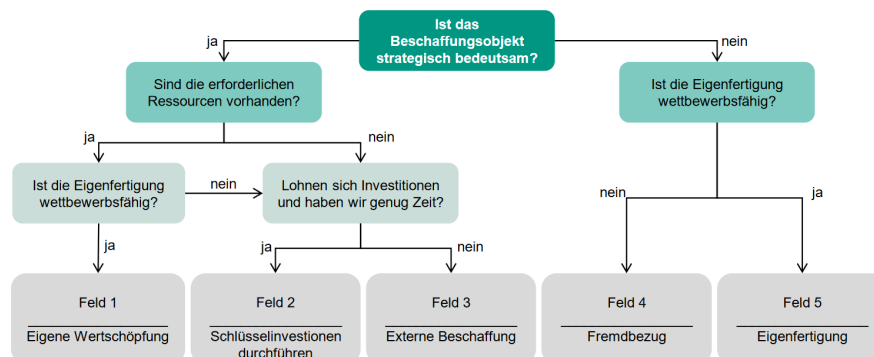
Ripple Effekt: Dynamik, die bei einer disruptiven Störung (z.B. Naturkatastrophen) an einer Stelle der SC bei den nachgelagerten Wertschöpfungspartnern auftritt → **Gegenmaßnahmen** s. *Produktion VL 3, F31*

Vergleich Bullwhip und Ripple Effekt:

Merkmal	Ripple-Effekt	Bullwhip-Effekt
Welche Unsicherheiten ?	Risiko, große Unsicherheit	Stochastische Unsicherheit
Welche Risiken?	Außergewöhnliche Risiken z. B. Explosion eines Kraftwerks	Operatives, wiederkehrendes Risiko z.B. Nachfrageschwankungen
Was kann gestört werden?	Strukturen und kritische Leistung (wie Verfügbarkeit der Lieferanten oder Umsatz)	Betriebsparameter wie Anlaufzeit und Bestand
Wie werden Abweichungen vermieden?	Proaktive Redundanz und Flexibilität	Informationskoordinierung
Was passiert nach der Beeinträchtigung?	Kurzfristige Stabilisierung und mittel- und langfristige Erholung, hoher Koordinationsaufwand und Investitionen	Kurzfristige Koordination zum Ausgleich von Nachfrage und Angebot
Einfluss auf die Leistung	Ausbringungsleistung kann abnehmen, z.B. jährliche Einnahmen oder Gewinne	Aktuelle Leistung kann sinken, z. B. durch tägliche oder wöchentliche Fehlbestände/Überschusskosten

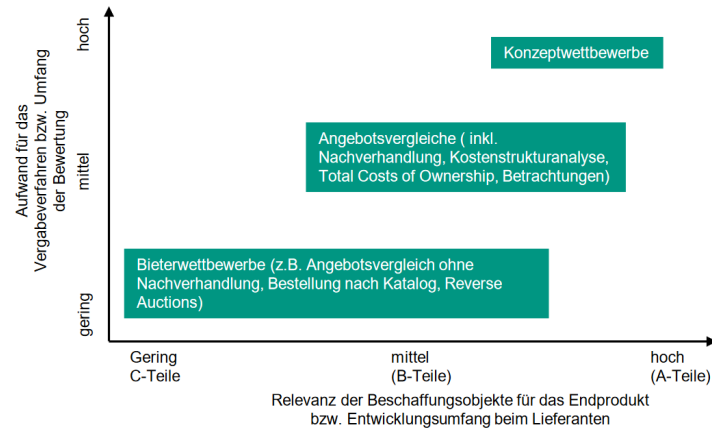
Lieferantenmanagement: Ziel: Stärkung der Wettbewerbsposition des Unternehmens durch eine optimale Zusammenarbeit Lieferanten

1. **Lieferantenstrategie:** Auswahl der richtigen Lieferanten, Eigen- oder Fremdfertigung?, Wahl der Werkzeuge im Lieferantenmanagement...
2. **Lieferantenauswahl:** Auswahl der Lieferanten auf Basis der Lieferantenstrategie, unternehmensinterne und -externe Faktoren (*VL 3, F38*)

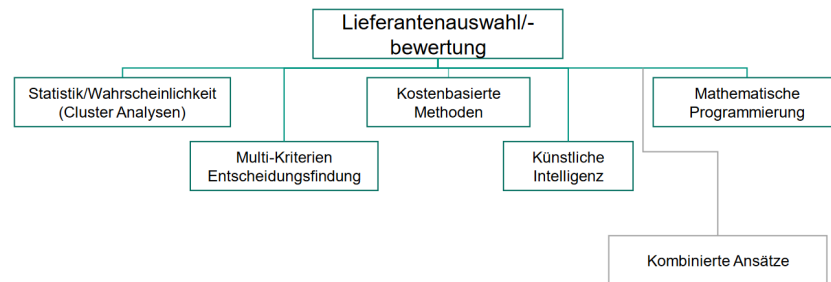


3. Lieferantenbewertung:

- Auswahl Bewertungsaufwand:



- Bewertungsfaktoren z.B. Flexibilität, Standort, Kapazität
- Methodenauswahl:



Nutzwertanalyse gehört zu **Multi-Attribute Decision Making** innerhalb der **Multi-Kriterien-Entscheidungsfindung**

Nutzwertanalyse: Systematisches Treffen von Entscheidungen bei überschneidungsfreien Handlungsalternativen. **Vorgehen:**

1. Benennung des Entscheidungsproblems
2. Aufstellen des Zielsystems/Festlegung der Bewertungskriterien
3. Gewichten der Ziele und Kriterien
4. Transformation der Bewertungsdimensionen in dimensionslose Skala mit gleichem Umfang
5. Aufstellen einer Bewertungsmatrix und Ausfüllen
6. Berechnung der Nutzenwerte der Alternativen

Beispiele: VL 2, F49-55 und Tut 2

Vorteile Nutzwertanalyse:

- Methode ist einfach und verständlich
- Komplexe Entscheidungen werden überschaubarer
- Entscheidungsfindung ist transparent und systematisch

Nachteile Nutzwertanalyse:

- Analyse ist zeit- und arbeitsintensiv
- Zielsysteme müssen vollständig sein
- Fachwissen wird vorausgesetzt

6 End-of-Life in der Circular Economy

Reverse Supply Chain Planning: Alle Aktivitäten, die notwendig sind, um **End-of-Life** (EoL) Produkte zu sammeln und zu bearbeiten

→ Restwert erhöhen oder negative Auswirkungen minimieren oder so bearbeiten, dass sie wieder in Wertschöpfungsprozesse einfließen können

Einteilung von Mehrwegsystemen:

- **Betriebseigene Mehrwegsysteme (Insellösungen):**
 - Anschaffung von individuellen Mehrwegverpackungen
 - **Vorteile:** Branding der Verpackungen, bessere Anpassbarkeit an Produkte
 - **Nachteile:** Hohe Kosten durch geringe Anzahl benötigter Verpackungen, Unternehmerisches Risiko
- **Gemeinsame Mehrwegsysteme (Poollösungen):**
 - Zusammenschluss mehrere Unternehmen, Beziehung der gleichen Verpackungen von einem Poolanbieter
 - **Vorteile:** Geringere Kosten, Schwankungen der Nachfrage können ausgeglichen werden, Flexible Rückgabe für den Kunden
 - **Nachteile:** Standards der Mehrwegbehälter müssen eingehalten werden, ggf. müssen Kosten getragen werden, die nicht vom eigenen Kunden verursacht wurden

Rechenbeispiel s. Produktion Übung, F19-20

Kosten eines Mehrwegsystems:

- **Ökonomische Kostenkomponenten:** Einkaufspreis, Lagerungskosten, Transportkosten
- **Ökologische Kosten:** Transportwege, Verluste, Verpackungsmaterialien

7 Einführung in die Energiewirtschaft

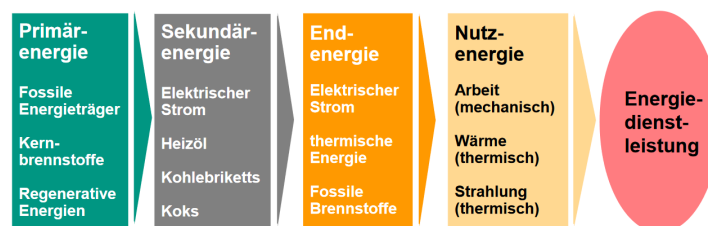
Energiewirtschaft: Einrichtungen und Handlungen mit dem Ziel, die Versorgung von Haushalten und Betrieben mit Energieträgern sicherzustellen

Umrechnung von Einheiten: *siehe Tut 1*

10^1	deca (da)	10^{-1}	deci (d)
10^2	hecto (h)	10^{-2}	centi (c)
10^3	kilo (k)	10^{-3}	milli (m)
10^6	mega (M)	10^{-6}	micro (μ)
10^9	giga (G)	10^{-9}	nano (n)
10^{12}	tera (T)	10^{-12}	pico (p)
10^{15}	peta (P)	10^{-15}	femto (f)
10^{18}	exa (E)	10^{-18}	atto (a)

Definitionen:

- **Energieträger:** Stoffe, aus denen oder nach deren Umwandlung Energie gewonnen werden kann
- **Primärenergie:** Nutzbarer Energiegehalt von Primärenergieträgern, die in der Natur vorkommen und noch keiner Umwandlung unterworfen sind
- **Sekundärenergie:** Energie, die als Ergebnis eines Umwandlungsprozesses und unter Energieverlust aus der Primärenergie gewonnen wird **Endenergie:** Dem Endverbraucher zur Verfügung stehende Energie
- **Nutzenergie:** Energie, die nach der letzten Umsetzung in den Geräten des Verbrauchers zur Verfügung steht
- **Energiedienstleistung:** Leistungen, die durch Einsatz der Nutzenergie beim Kunden erfüllt werden, z.B. Personentransport oder Raumausleuchtung



Wichtige Energieträger: Kohle, Öl, Gas, Kernenergie, Erneuerbare Energie

8 Transformationspfade in der Energiewirtschaft

Energiepolitische Herausforderungen: Weltbevölkerung steigt → Primärenergieverbrauch steigt → Steigende CO₂ Emissionen weltweit

Energiewirtschaftliche Viereck: Forderung nach gesicherter, bezahlbarer, umweltfreundlicher, akzeptierter Energieversorgung

CO₂-Emissionen in Deutschland: Die meisten CO₂-Emissionen im Energiesektor durch Stein- und Braunkohle → Tendenz sinkend

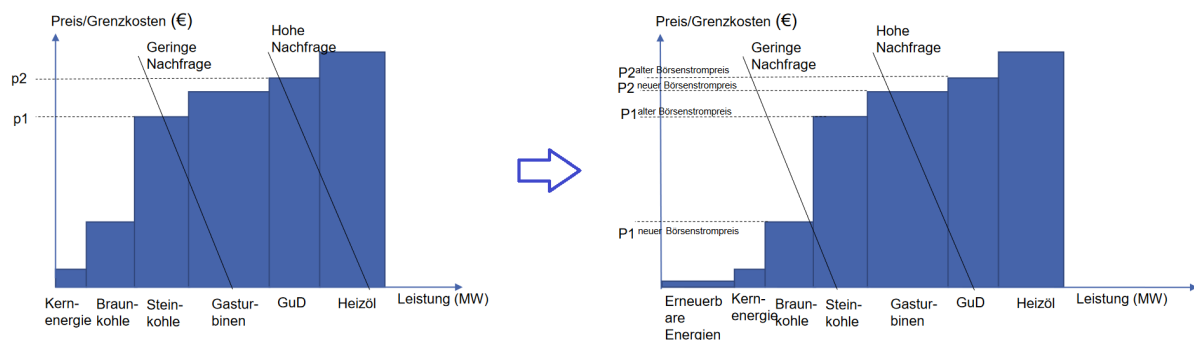
Energiepolitische Ziele in Deutschland:

- Treibhausgasemissionen sollen bis 2030 um 65% sinken (im Vergleich zu 1990)
- Ausbau erneuerbarer Energien
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2030 auf 80%
- Reduzierung des Primärenergieverbrauchs bis 2050 um 50% (im Vergleich zu 2008)

Herausforderungen für deutsches Stromsystem:

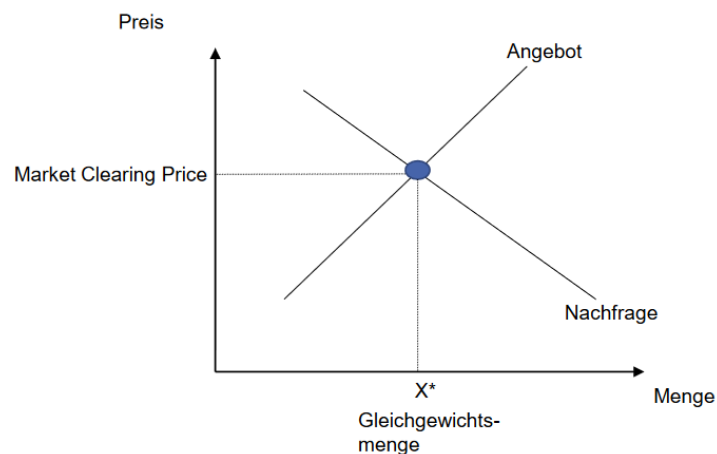
- Paradigmenwechsel durch die Integration von erneuerbarer Energie
- Veränderte Angebots- und Nachfragestruktur → Zentral zu dezentral → Verlagerung von Großkraftwerken hin zu kleinen dezentralen Erzeugungseinheiten und neue Konsumenten wie Elektrofahrzeuge

Auswirkung von erneuerbarer Energie auf das Merit-Order Modell:



- **Merit-Order:** Kraftwerkseinsatzreihenfolge basierend auf den Grenzkosten der Elektrizitätserzeugung
- Kraftwerksreihenfolge wird durch erneuerbare Energien verschoben → Strompreis sinkt

Strompreis:



- Börsenpreis entspricht dem Schnittpunkt von Angebot und Nachfrage
- **Market Clearing Price** entspricht den Grenzkosten des letzten Kraftwerks, dass zur Deckung der Stromnachfrage benötigt wird

Klimaschutzziele (KSG):

- 2030: 15 Mio. Elektrofahrzeuge
- 2030: 85 Mio. t CO₂ (2021: 148 Mio. t CO₂)
- 2045: CO₂-frei

9 Energie als Produktionsfaktor

Endkundenmarkt:

- Liberalisierung der Strommärkte: freie Wahl der Energielieferanten
- Endkunden können aus über 1200 unterschiedlichen Stromlieferanten deutschlandweit wählen

Endkundentypen:

- **SLP Kunden:**
 - Privathaushalte/Gewerbekunden mit Jahresstromverbrauch ≤ 100.000 kWh
 - Ohne registrierte Leistungsmessung: Lastgang wird mittels Standardlastprofil ermittelt

- **RLM Kunden:**

- Industriekunden und große Unternehmen
- Registrierende Leistungsmessung ab Jahresstromverbrauch > 100.000 kWh

Lastganglinie: Darstellung der Leistungsaufnahme von Abnehmern über einen bestimmten Zeitraum → s. **H0/G0-Profile** VL 3, F7-8

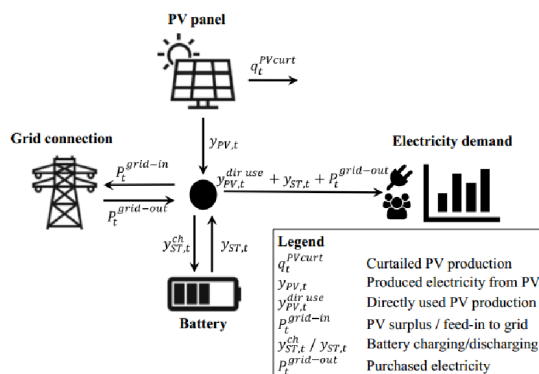
Strompreis für einen Haushalt: ca. 40 ct/kWh, Tendenz steigend

Prosumer: Sowohl Producer als auch Consumer, z.B. durch PV-Anlage → Transformation des zentralen Stromsystems zu dezentralem Stromsystem

Eigenverbrauchsquote: Anteil der lokalen Erzeugung, der selbst verbraucht wird

Autarkiegrad: Anteil der gesamten jährliche Stromnachfragen die durch eigene Erzeugung gedeckt wird

Netzparität: Zeitpunkt, ab dem die Kosten für Strom aus erneuerbaren Energien genauso hoch sind wie für Strom, der aus dem Netz bezogen wird



- **Eigenverbrauchsquote**

$$\frac{\sum_{t=0}^T (y_{PV,t}^{dir\text{ use}} + y_{ST,t}) \cdot \Delta t}{\sum_{t=0}^T (y_{PV,t} + q_{PV,t}^{curt}) \cdot \Delta t}$$

- **Autarkiegrad**

$$\frac{\sum_{t=0}^T y_{PV,t} \cdot \Delta t}{\sum_{t=0}^T D_t \cdot \Delta t}$$

Smart-Meter: Intelligente Messsysteme zur effizienten Steuerung des Stromverbrauchs entsprechend der volatilen Erzeugung

Stromtarife:

- Zeitvariable Tarife: Time-of-use, Critical Peak Pricing, Real-Time-pricing
- Lastvariable Tarife
- Dynamische Tarife

Energie in der Industrie:

- Mehr als ein Viertel des Energieverbrauchs in Deutschland entfällt auf die Industrie
- Erdgas und Strom sind wichtigste Energieträger in der Industrie
- Große regionale Unterschiede beim Energieverbrauch

- Größter Energieverbraucher: Chemische Industrie

Bewertung der Produktionsprozesse hinsichtlich des Energieverbrauchs:

- Energieintensität = Energieverbrauch pro Tag / Stückzahl pro Tag
- Effizienzgrad = Referenzwert / gemessener Energieverbrauch

Energiewertstrommethode:

- Methode zur Analyse der Energieeffizienz
- **Energiewertstromanalyse:** Aufnahme der Energieverbraucher mit den Verbrauchswerten, Ermittlung des Energieeinsparpotenzials
- **Energiewertstromdesign:** Gestaltung eines Soll-Konzepts anhand von Richtlinien (s. VL 3, F27), Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen
- **Umsetzung:** Umsetzung des Soll-Konzepts durch Maßnahmen

Ziele der Energiewertstromanalyse:

- Kennzahlenbildung zur Effizienzbewertung
- Grundlage für die Optimierung des Energieeinsatzes
- Abschätzung der Energieeinsparpotenziale
- Identifikation der wesentlichen Energieverbrauchsarten

10 Saalübung zu Energiewirtschaft

Beispiele für OR in der Energiewirtschaft:

- Netzplanung
- Minimierung der Umwandlungsverluste
- Maximierung der Erlöse aus der Strom- und Wärmeproduktion
- Minimierung der Betriebskosten

Kosten der Stromerzeugung:

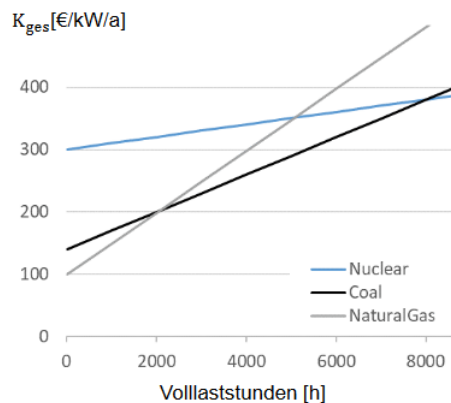
Fixe Kosten	Variable Kosten
<ul style="list-style-type: none"> • Investitionsausgaben • Stilllegungs- und Abfallentsorgungskosten • Fixe Betriebs- und Instandhaltungskosten • Steuern und Versicherungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Variable Betriebskosten • Brennstoffkosten • Zertifikatskosten

- Erzeugungstechnologien unterscheiden sich stark bei Kostenstruktur

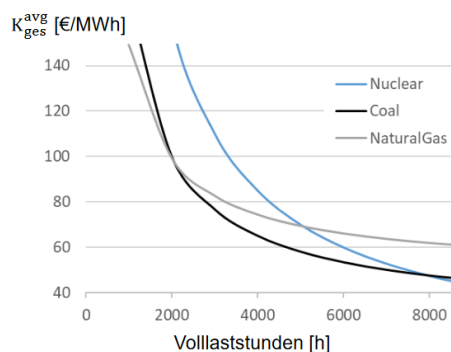
- Vergleich der Kosten von Erzeugungstechnologien durch:
 - Statische Kostenvergleichsrechnung: **Screening Kurven**
 - Dynamische Investitionsrechnung: **Stromgestehungskosten (LCOE)**

Screening Kurven:

- Stellen Gesamtkosten/Durchschnittskosten einer Erzeugungstechnologie pro Jahr und pro Kapazitätseinheit dar
- Vergleich von Kostenstrukturen der verschiedenen Technologien
→ Bestimmung der kostengünstigsten Erzeugungstechnologie in Abhängigkeit der Volllaststunden
- **Gesamtkostenkurve:** $K_{ges}(t) = I_0 \cdot a + C^{var} \cdot t$ mit I_0 : Kapitalkosten, a : Annuitätenfaktor, C^{var} : variable Kosten, t : Volllaststunden
- $a = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1}$



- **Durchschnittskostenkurve:** Mit steigenden Volllaststunden nähern sich die Durchschnittskosten den variablen Kosten an



Stromgestehungskosten:

- Levelized costs of electricity (LCOE)

- Alle Kosten, die bei Umwandlung einer Energieform in elektrischen Strom anfallen
- **Kosten des Kraftwerksbetriebs:** Kosten für Errichtung und jährlichen Betrieb einer Anlage im Verhältnis zur Stromerzeugungsmenge der gesamten Lebensdauer
- **Nachteile:** Keine Aussage über Wirtschaftlichkeit der Anlage, Flexibilität der Anlage wird nicht berücksichtigt

■ Kapitalwertmethode

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=0}^T \overbrace{(C_t^{fix} + C_t^{var})}^{\text{Jährliche Gesamtkosten}} \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=0}^T E_t \cdot (1+r)^{-t}}$$

■ Annuitätenmethode

$$LCOE = \frac{I_0 \cdot a + (\sum_{t=0}^T (C_t^{fix} + C_t^{var}) \cdot (1+r)^{-t}) \cdot a}{\frac{\sum_{t=1}^T E_t}{T}}$$

$$LCOE = \frac{I_0 \cdot a + c^{fix} + c^{var}}{E}$$

I_0	Investitionsausgaben [€/MW]
c_t^{var}	Variable Betriebskosten
c_t^{fix}	Fixe Betriebskosten
E_t	Produzierte Strommenge
r	Realer kalkulatorischer Zinssatz
T	Nutzungsdauer in Jahren
t	Jahr der Nutzungsperiode
a	Annuitätenfaktor

- **Einheit:** €/MWh oder Cent/kWh

Beispielrechnung: Übung F25-26

Unit commitment model: OR-Modell zur Kraftwerkseinsatzoptimierung

- **Zielfunktion:** $\min_{y_{ut}, s_{ut}} \sum_{t=1}^T \sum_u c_u^{var} \cdot y_{ut} \cdot \Delta t + \sum_{t=1}^T \sum_u (c_u^{start} \cdot s_{ut})$

- **Nebenbedingungen:**

1. Gleichgewicht bei Nachfrage und Angebot: $\sum_u y_{ut} \cdot \Delta t = D_t \cdot \Delta t \quad \forall t$
2. Kapazitätsgrenzen der Technologien: $y_{ut} \leq K_u \cdot o_{ut} \quad \forall u, t$
3. Minimale Produktionsgrenze: $y_{ut} \geq P_u^{\min} \cdot o_{ut} \quad \forall u, t$
4. Start-up Bedingungen: $s_{ut} \geq o_{ut} - o_{u,t-1} \quad \forall u, t$
5. Erzeugung durch Erneuerbare Energien: $y_{ut} \leq w_{ut} \cdot K_u \quad \forall u, t$
6. Variablenschranken:

$$y_{ut}, D_t \geq 0 \quad \forall u, t$$

$$o_{ut}, s_{ut} \text{ Binärvariable} \quad \forall u, t$$

- Variablen:

$u \in U$	Erzeugungstechnologien
c_u^{var}	Variable Kosten
y_{ut}	Output
Δt	Zeitschritt
c_u^{start}	Kosten für start-ups
s_{ut}	Entscheidungsvariable für start-ups
o_{ut}	Entscheidungsvariable für Betrieb
D_t	Nachfrage
K_u	Installierte Kapazität
P_u^{min}	Min. Outputlevel

OR-Modell: Investitionsplanung und Kraftwerkseinsatz:

- Zielfunktion: Minimiere Kosten

$$\min_{y_{l,u}, x_u} \sum_{l \in L} \bar{T}_l \left(\sum_u c_u^{var} \cdot y_{l,u} \right) + \sum_u c_u^{gen} \cdot x_u$$

- Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} s. t. \quad & \sum_u y_{l,u} = \bar{D}_l & \forall l & \quad (1) \\ & y_{l,u} \leq x_u & \forall u, l & \quad (2) \\ & y_{l,u} \geq 0 & \forall u, l & \quad (3) \\ & x_u \geq 0 & \forall u & \quad (4) \end{aligned}$$

$u \in U$	Erzeugungstechnologien
$l \in L$	Lastabschnitte der Jahresdauerlinie
\bar{D}_l	Lastlevel [in MW]
\bar{T}_l	Lastdauer [in h]
c_u^{var}	Variable Kosten
c_u^{gen}	Annualisierte Investitionsausgaben
$y_{l,u}$	Output
x_u	Installierte Kapazität