



BMFTR-Fördermaßnahme

# Regionales Phosphor-Recycling

Leitfaden mit Excel-Tool zur Durchführung der  
Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Anlagen  
der Phosphor-Rückgewinnung im Rahmen der  
BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Forschung, Technologie  
und Raumfahrt

**FONA**

Forschung für Nachhaltigkeit



BMFTR-Fördermaßnahme

**RePhoR**  
**Regionales Phosphor-Recycling**

**Leitfaden mit Excel-Tool zur Durchführung  
der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Anlagen  
der Phosphor-Rückgewinnung im Rahmen der  
BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR**



## Projektbearbeitung

### Institution

Forschungsinstitut für Wasserwirtschaft und  
Klimazukunft an der RWTH Aachen (FiW) e.V.  
An der Ölmühle 4  
52074 Aachen

### Bearbeitung

Erik Leuschner, B.Sc.  
Dr.-Ing. Kristoffer Ooms  
Dr. sc. Frank-Andreas Weber  
Prof. Dr.-Ing. Johannes Pinnekamp

### Im Unterauftrag

TUTTAHS & MEYER Ingenieurgesellschaft für  
Wasser-, Abwasser und Energiewirtschaft mbH  
Auf der Hüls 162  
52068 Aachen

Prof. Dr.-Ing. Markus Schröder  
Wolfram Schröder, M.Sc.  
Maximilian Loderhose, M.Sc.

## Zitationshinweis

Leuschner, E., Ooms, K., Weber, F.-A., Pinnekamp, J., Schröder, W., Loderhose, M., Schröder, M. (2025): Leitfaden mit Excel-Tool zur Durchführung der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Anlagen der Phosphorrückgewinnung im Rahmen des BMFTR-Fördermaßnahme RePhoR. Der Leitfaden ist ein Produkt des BMFTR-Verbundvorhabens TransPhoR unter Förderkennzeichen 02WPR1539A. FiW e. V., Aachen.

Die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Leitfadens liegt bei den Autoren.

## Excel-Tool

Das entwickelte Excel-Tool steht kostenfrei auf der Homepage der RePhoR-Maßnahme zum Download zur Verfügung:

[https://www.bmbf-rephor.de/wp-content/uploads/Exceltool\\_Wirtschaftlichkeit\\_TransPhoR.xlsx](https://www.bmbf-rephor.de/wp-content/uploads/Exceltool_Wirtschaftlichkeit_TransPhoR.xlsx)



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung und Anwendung des Leitfadens.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....</b>	<b>4</b>
3.1	Betrachtungsgrößen .....	6
3.2	Bewertungskriterien und Zielgrößen.....	7
3.3	Kostenarten und -schätzung.....	7
3.3.1	Investitionskostenermittlung .....	8
3.3.2	Ersatzinvestitionen und Restbarwert.....	8
3.3.3	Betriebskostenschätzung .....	9
3.3.3.1	Energiekosten.....	9
3.3.3.2	Betriebsmittel und P-Rezyklat .....	9
3.3.3.3	Personalaufwand.....	9
3.3.3.4	Instandsetzung und Versicherung .....	9
3.3.3.5	Transport/Entsorgungskosten .....	10
3.4	Zeiträume.....	10
3.5	Kalkulationszinssatz .....	11
3.6	Preisänderungsraten .....	11
<b>4</b>	<b>Durchführen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>13</b>
4.1.1	Kapitalwertmethode.....	14
4.1.2	Annuitätenmethode .....	15
<b>5</b>	<b>Szenario- und Sensitivitätsanalyse.....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Beispiel einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....</b>	<b>18</b>
6.1	Kapitalwertberechnung .....	20
6.2	Annuität.....	20
6.3	Excel-Tool als Berechnungshilfe für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	21

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung des Bilanzraumes eines integrierten Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung – Struvit- bzw. MAP-Fällung .....	4
Abbildung 3-2:	Schematische Darstellung eines Bilanzraumes für den nasschemischen Aufschluss von Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche .....	5
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung eines Bilanzraumes für den thermochemischen Aufschluss von Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlammasche .....	5
Abbildung 3-4:	Verdeutlichung der für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevanten Größen .....	6
Abbildung 4-1:	Graphische Darstellung der Kapitalwertmethode .....	14
Abbildung 4-2:	Graphische Veranschaulichung der Annuitätenmethode .....	15
Abbildung 6-1:	Investitionskosten aufgeschlüsselt nach der DIN 276 - Kosten im Bauwesen.....	19

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Kostengruppen der DIN 276 - Kosten im Bauwesen.....	8
Tabelle 2:	Statische und dynamische Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung (Noosten 2018).....	13
Tabelle 3:	Kostenpunkte zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit.....	19

## Verzeichnis der Anlagen

Excel-Tool mit Beispiel einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

**Abkürzungsverzeichnis**

BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef
EMSR	Elektrisches Messen, Steuern und Regeln
KG	Kostengruppe
KVR	Kostenvergleichsrechnung
LAWA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
NPV	Kapitalwert (engl. Net Present Value)
P	Phosphor
PV	Barwerte (engl. Present Value)
RePhoR	Fördermaßnahme „Regionales Phosphor-Recycling“
T	Betrachtungszeitraum
TA	Technische Anlagen
T <sub>N</sub>	Nutzungsdauer
TransPhoR	Wissenschaftliches Begleitvorhaben der Fördermaßnahme RePhoR



## 1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines zunehmend großen Bedarfs an wirtschaftlichen und nachhaltigen Lösungen zum Phosphor (P)-Recycling hat das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) die Fördermaßnahme „Regionales Phosphor-Recycling“ (RePhoR) im Rahmen der BMFTR-Strategie „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ ins Leben gerufen. Ziel ist es, durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten. Durch die daraus resultierende verstärkte Nutzung von Sekundärphosphor aus der Kreislaufwirtschaft soll die Abhängigkeit Deutschlands von Phosphorimporten maßgeblich verringert werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene Technologien zur P-Rückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm oder Klärschlammverbrennungsasche großtechnisch umgesetzt und somit wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse und praktische Erfahrungen unter realen Bedingungen gesammelt. Für die lokal anfallenden Klärschlämme werden innovative regionale Verwertungskonzepte entwickelt und im Demonstrationsmaßstab realisiert. Sie sollen als Vorbild für andere Regionen mit vergleichbaren Bedingungen dienen. Das BMFTR fördert im Rahmen von RePhoR sieben Verbundprojekte. Jedes Verbundprojekt wird von Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis bearbeitet, welche unterschiedliche technische Lösungen im Rahmen der Fördermaßnahme umsetzen.

Begleitend wird die Maßnahme durch das Vernetzungsvorhaben TransPhoR (Transfervorhaben zum Regionalen Phosphor-Recycling) unterstützt. Hierbei werden neben übergreifenden Aufgaben im Begleitprozess (bspw. Vernetzung, Organisation von Veranstaltungen, Presse- und Öffentlichkeitsarbeit) auch fachliche Rahmenbedingungen erarbeitet. Das Vernetzungsvorhaben soll gezielt Handlungsempfehlungen geben und umsetzbare Lösungen für die Problematik der nachhaltigen, regionalen Phosphor-Recyclings aufbereiten. Die einzelnen Verfahren und Umsetzungen der Verbundvorhaben werden dafür unter verschiedenen Gesichtspunkten auf ihre Umsetzbarkeit geprüft. Es soll verdeutlicht werden, welche Anwendungen für die jeweiligen Rahmenbedingungen vorzuziehen sind und welche Produktqualität beziehungsweise -quantität zu erwarten ist.

Für die Kläranlagenbetreiber, welche laut Klärschlammverordnung ab 2029/32 in der Pflicht zum P-Recycling stehen, sind dies wichtige Informationen und Daten als Entscheidungsgrundlage. Um das P-Recycling fristgerecht zu ermöglichen, ist es nötig, in technische Lösungen zu investieren und organisatorische Weichen zu stellen. Eine Umfrage der Deutschen Phosphor Plattform zeigt aber, dass ein Großteil der befragten Klärschlammherzeuger sich noch nicht auf eine Technologie festgelegt haben. Nahezu die Hälfte plante im Jahr 2023 nicht, den verpflichtenden Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen für die Phosphorrückgewinnung bei der zuständigen Überwachungsbehörde einzureichen. Diese Ergebnisse lassen vermuten, dass die Relevanz der Thematik noch nicht ausreichend erkannt wurde und gleichzeitig wesentliche Entscheidungsgrundlagen fehlen. Die wichtigsten Kriterien für den

Entscheidungsprozess für einen Partner zur Phosphorrückgewinnung sind laut Umfrage die Entsorgungssicherheit, eine einfache Umsetzung und weiterhin der Preis (Knickel et al. 2022). Vor dem rechtlichen Hintergrund besteht somit Handlungsbedarf zur Klärung der verschiedenen am Markt verfügbaren Technologien und der damit verbundenen Kosten. Neben den technischen Fragestellungen ist also die Beantwortung der Kostenfrage ein wesentlicher Aspekt hinsichtlich einer zukünftigen Umsetzung.

Dieser Leitfaden soll als Hilfestellung dienen, unterschiedliche Anlagen zum P-Recycling mittels einheitlicher Kriterien auf ihre Wirtschaftlichkeit zu untersuchen und kostentechnisch einzuordnen.

## 2 Zielsetzung und Anwendung des Leitfadens

Um die unterschiedlichen Konzepte des P-Recyclings einschließlich der angewandten Verfahren näherungsweise vergleichbar bewerten zu können, müssen einheitliche Standards und Kriterien für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung definiert werden. Ziele sind hierbei die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Bewertung sowohl für die im Rahmen des Vorhabens betrachteten als auch für weitere (zukünftige) Verfahren. Hierzu wird eine standardisierte Berechnungsmethode vorgeschlagen, die sowohl die Investitionskosten als auch laufende Kosten (z.B. Personal, Energie, Betriebsmittel, Ausgangsstoffe) berücksichtigt. Diese werden dem monetären Nutzen, der durch die Rezyklate und Nebenprodukte entsteht, gegenübergestellt. Kalkulationsparameter (z.B. Preise, Nutzungsdauern, Zinssätze) werden nachvollziehbar hergeleitet. Des Weiteren ist es geboten, Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den Einfluss von potenziellen Änderungen der Berechnungsparameter berücksichtigen zu können.

Mithilfe der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung lassen sich sowohl Aussagen über den finanziellen Nutzen von Investitionen als auch Ertragsaussichten des erforderlichen Kapitaleinsatzes innerhalb eines gewählten Betrachtungszeitraums treffen. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermöglicht es im Allgemeinen, verschiedene Alternativen mit ungleichen Kostenströmen zu vergleichen und hinsichtlich ihres unternehmerischen Erfolges zu bewerten.

Auf verwendete wirtschaftswissenschaftliche Konzepte und Begrifflichkeiten wird im Rahmen dieses Leitfadens eingegangen, jedoch wird empfohlen, sich für ein tieferes Verständnis der Thematik mit der aufgelisteten Literatur auseinanderzusetzen. Es ist anzumerken, dass die vorgestellte Literatur die Hauptaspekte der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung abdeckt, jedoch nicht alle Möglichkeiten zur Gestaltung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung behandelt. Dieser Leitfaden orientiert sich an folgenden Normen, Richtlinien und Arbeitsblätter aus Wirtschaft und Wissenschaft:

- Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien, 2012)
- DIN 276 – Kosten im Bauwesen (2018)
- DIN EN 60300-3-3 – Lebenszykluskosten (2014)
- DWA-A 133 – Werteermittlung von Abwasseranlagen (2021)
- DWA-M 803 – Kostenstrukturen in der Abwassertechnik (2006)
- DWA-M 811 – Definition betriebswirtschaftlicher Begriffe in der Wasserwirtschaft (2024)
- VDI 2067 – Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung (2012)
- VDI 6025 – Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen (2012)

### 3 Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Vor dem Hintergrund, dass eine standardisierte Vorgehensweise und Berechnungsmethode erarbeitet werden soll, zeigt sich bei genauerer Betrachtung der P-Rückgewinnungsverfahren ein komplexerer Sachverhalt, da es unterschiedliche Technologien gibt, die man nicht direkt miteinander vergleichen kann. Die Verfahrenstechniken zur P-Rückgewinnung lassen sich in drei übergeordnete Kategorien einteilen:

- Struvit-Fällung,
- Nasschemische Verfahren,
- Thermochemische Verfahren.

Außerdem unterscheiden sich die Verfahren auch innerhalb der übergeordneten Kategorien, sei es hinsichtlich ihrer Verfahrenstechnik oder vom Stand der Technologie oder Erfahrungsgrad (Pilotanlagen, halbtechnische Anlagen, großtechnische Umsetzung etc.). Eine grobe Skizzierung der Verfahren ist den nachstehenden Abbildungen und zugehörigen Erläuterungen zu entnehmen und soll die Thematik verdeutlichen, dass ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Verfahren nur bedingt möglich ist.

#### Struvit-Fällung

Bei der Struvit-Fällung handelt es sich um ein P-Rückgewinnungsverfahren, welches in den Abwasserreinigungsprozess integriert wird (integriertes Verfahren). Durch die Zugabe von Fällmitteln kann das im Abwasser enthaltene Phosphor in Form von Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP) extrahiert werden. Diese phosphor- und stickstoffhaltige Verbindung (Struvit) erweist sich als ein gut pflanzenverfügbarer und ressourcenschonender Dünger.

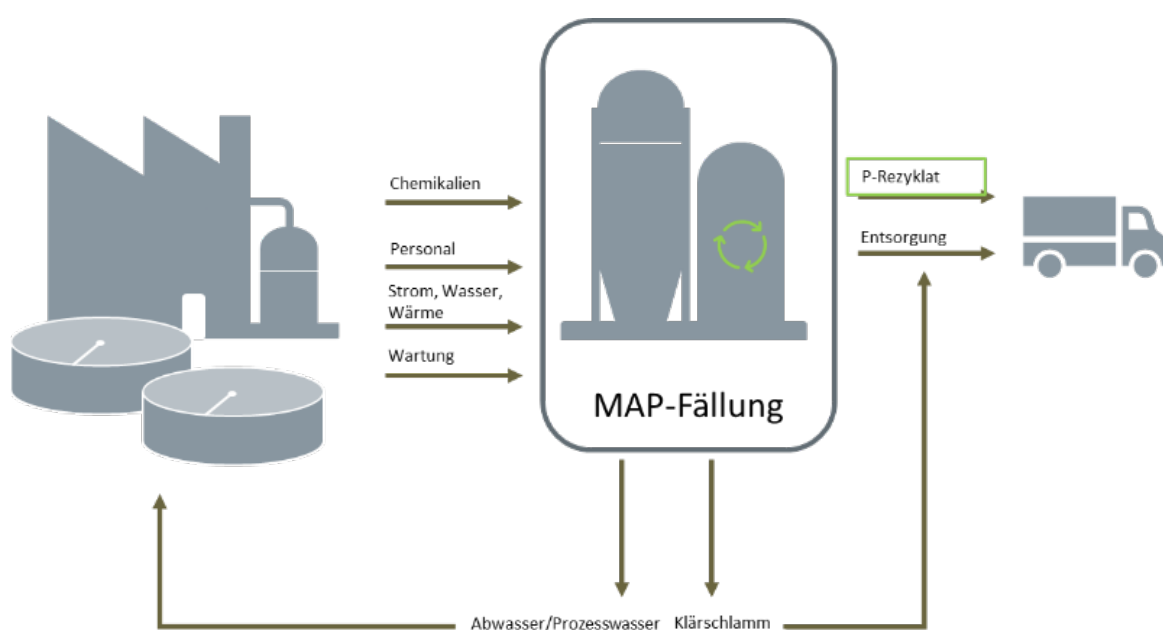
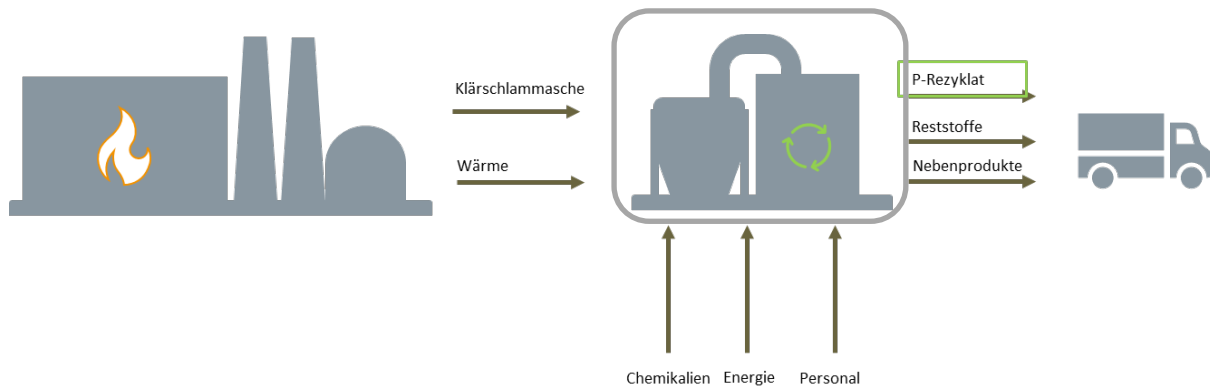


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Bilanzraumes eines integrierten Verfahrens zur Phosphorrückgewinnung – Struvit- bzw. MAP-Fällung

### Nasschemische Verfahren

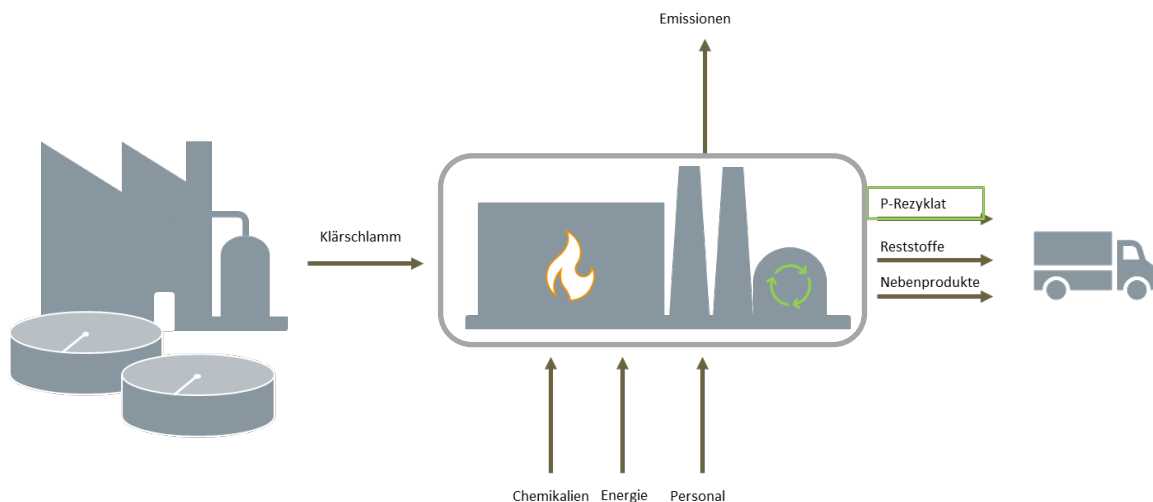
Bei den nasschemischen Verfahren handelt es sich um nachgeschaltete Verfahren der P-Rückgewinnung. Hierbei wird der Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. aus der Klärschlamm- asche durch Zugabe von Additiven extrahiert bzw. aufgeschlossen. Bei dem entstehenden Produkt handelt es sich i. d. R. um hochwertige Phosphorsäure.



**Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines Bilanzraumes für den nasschemischen Aufschluss von Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlamm- asche**

### Thermochemische Verfahren

Bei diesen Verfahren findet der Aufschluss des Phosphors aus dem Klärschlamm thermisch statt. Der Klärschlamm wird zuvor getrocknet und danach bei sehr hohen Temperaturen um die 900°C verbrannt. Durch den Verbrennungsprozess kommt es unter anderem zur Reduktion von Metallgehalten und anderen organischen Schadsstoffen. Das entstandene P-Rezyklat kann je nach Verfahren direkt als Dünger verwendet werden oder erfordert eine weitere Nach- behandlung zur Düngemittelzulassung.



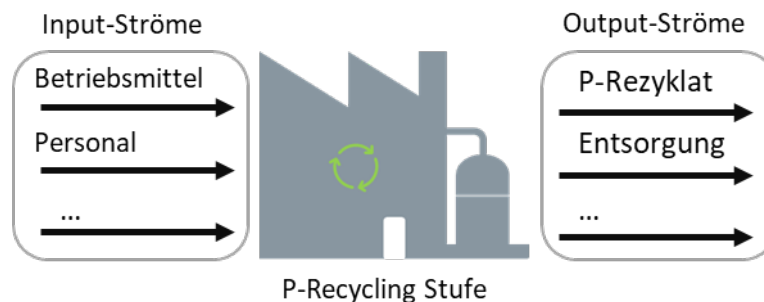
**Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Bilanzraumes für den thermochemischen Aufschluss von Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. der Klärschlamm- asche**

Dieser Sachverhalt erfordert es allgemeingültige Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung festzulegen, die für alle Verfahrensarten gelten. Weiterhin sind die Methoden einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu verwenden, die im Rahmen der verfügbaren Informationen anwendbar sind, um die Reproduzierbarkeit und Einheitlichkeit zu gewährleisten.

### 3.1 Betrachtungsgrößen

Angelehnt an die DIN EN 60300-3-3 „Lebenszykluskosten“ werden für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Kosten untersucht, die „eine Einheit während eines Teils ihrer Lebensdauer oder über den gesamten Lebenszyklus hinweg verursachen wird“ (DIN EN 60300-3-3).

Anwenden dieses Leitfadens wird empfohlen, für die Bilanzierung der Verfahren hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit alle In- und Outputströme zu identifizieren, denen direkt messbare Zahlungsströme zuzuordnen sind (s. Abbildung 3-4:). Die weitere wichtige Eingangsgröße sind die Investitionskosten für die Errichtung der P-Recycling Stufe.



**Abbildung 3-4: Verdeutlichung der für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung relevanten Größen**

Aufwendungen, die nicht direkt mit dem Verfahren verbunden sind, finden nicht Einzug in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Darunter würden beispielsweise vorgeschaltete Prozesse wie die Errichtung einer Monoverbrennungsanlage oder Verfahren der Abwasserreinigung fallen, die zwar für die Asche/MAP-Verfahren relevant sind, aber keinen direkten investiven Bezug aufweisen. Sollte sich beispielsweise bei den integrierten Verfahren herausstellen, dass sich eine direkte Zuordnung von Kosten als schwierig erweist, so ist der Mehrbedarf an Ressourcen (z.B. Energie), der sich aus dem zusätzlichen Betrieb der MAP-Fällung ergibt, anzusetzen.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind alle direkt monetär messbare Zahlungen und Zahlungsströme zu identifizieren, die mit der Verfahrenstechnik verbunden sind (betrieblich und kapitalgebunden).

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die gewählte Methodik an den Analysezielen festgemacht wird und diese von folgenden Punkten abhängig sind (DIN EN 60300-3-3):

- Bedarf für eine absolute oder vergleichende Analyse bzw. Betrachtung,
- erforderliche Genauigkeit,

- verfügbare Daten und
- verfügbare Ressourcen.

Die Betrachtungsgrößen geben somit den Umfang, den Detaillierungsgrad und den Rahmen des Möglichen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vor und bestimmen, welche Bewertungskriterien und Zielgrößen maßgebend sind.

### 3.2 Bewertungskriterien und Zielgrößen

Anhand der Betrachtungsgrößen werden die Bewertungskriterien und Zielgrößen abgeleitet. Da der Fokus auf den direkt messbaren Zahlungsströmen liegt, bilden die monetären Flüsse die Hauptbewertungskriterien. Die durch die Bewertungskriterien definierten Zielgrößen belaufen sich auf Gesamtkosten in EUR (Kapitalwert, Gesamtinvestition), Jahreskosten in Euro pro Jahr (Annuität, Gesamtbetriebskosten, Gesamterlöse) und daraus abgeleitete spezifische Kosten (z.B. EUR/t P, EUR/E\*a).

Des Weiteren können qualitative Bewertungskriterien definiert werden, wie z.B. Verfügbarkeit und Zugang zur Technologie, Vorteile aus dem P-Rückgewinnungsverfahren oder auch Qualität und Vermarktungsfähigkeit der P-Rezyklate. Da sie nicht unmittelbar quantitativ erfassbar sind, können sie in der Auswertung nur qualitativ berücksichtigt werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden sie lediglich in der Sensitivitätsanalyse aufgegriffen. Ansonsten konzentriert sich der Leitfaden nur auf die genannten Zielgrößen.

Die Bewertungsgrößen belaufen sich auf Gesamtkosten, Jahreskosten und spezifische Kosten.

### 3.3 Kostenarten und -schätzung

Die Bestimmung der Kostenarten richtet sich nach der VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Die Richtlinie unterscheidet vier Kostengruppen mit zugehörigen Kostenarten (VDI 2067):

- kapitalgebundene Kosten (Technische und bauliche Anlagen),
- bedarfsgebundene Kosten (Energiekosten und Betriebsstoffe),
- betriebsgebundene Kosten (Personalaufwand und Instandsetzung) und
- sonstige Kosten (u.a. relevant: Versicherung, Transport- und Entsorgungskosten).

Im Rahmen dieses Leitfadens werden die kapitalgebundenen Kosten als „Investitionskosten“ und die bedarfs- und betriebsgebundenen Kosten als „Betriebskosten“ bezeichnet. Die sonstigen Kosten bleiben von der Bezeichnung her unverändert. Alle Kosten sind als Nettokosten anzugeben.

### 3.3.1 Investitionskostenermittlung

Die DIN 276 – Kosten im Bauwesen – dient der Kostenplanung im Bauwesen, speziell für die „Ermittlung und der Gliederung von Kosten für den Neubau, Umbau und die Modernisierung von Bauwerken und Anlagen“. Diese Norm ist dafür ausgelegt eine einheitliche Vorgehensweise für die Kostenplanung sowie die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Kostenermittlungen zu schaffen mit dem Ziel, bei einem (Bau-)Projekt die Wirtschaftlichkeit, Kostensicherheit und -transparenz sicherzustellen.

Besteht ein Projekt aus unterschiedlichen Bauten, Anlagen, mehreren Bauwerken oder Abschnitten, die funktional, räumlich oder wirtschaftlich getrennt sind, so sind i. d. R. jeweils getrennte Kostenermittlungen aufzustellen (DIN 276). Die Kosten werden dabei wie folgt eingeteilt:

**Tabelle 1: Kostengruppen der DIN 276 - Kosten im Bauwesen**

Kostengruppe	Leistungsbereich
100	Grundstück
200	Vorbereitende Maßnahmen
300	Baukonstruktion
400	Technische Anlagen
500	Außenanlagen und Freiflächen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten
800	Finanzierung

Die DIN 276 gliedert die Kosten nach drei Ebenen, mit steigendem Detaillierungsgrad. Die Ebene 1 entspricht dem Kostenrahmen bei der die Kostengruppe (KG) nach den Hunderterstellen (z.B. KG 100, 200, 300 etc.) gegliedert sind. Es handelt sich bei dieser Kostenaufstellung um die Gesamtkosten der jeweiligen Kostengruppe. In Ebene 2 werden die Kostengruppen nach den Zehnerstellen aufgeschlüsselt (z.B. KG 120, 230, 340), die eine ausführlichere Kostengliederung der Kostengruppen bietet. In Ebene 3 wird die Kostengruppe nach den Einerstellen gegliedert (z.B. KG 112, 223,333) und entspricht einem Detaillierungsgrad nach den einzelnen Kostenelementen. Für die Investitionskosten sind die KG 300 und 400 entscheidend.

### 3.3.2 Ersatzinvestitionen und Restbarwert

Bei der Kostenkalkulation müssen i. d. R. nach Ende des Nutzungszeitraumes Ersatzinvestitionen getätigt werden. Die Ersatzinvestitionen finden in der Vorperiode statt, sodass die Produktion ungestört in der nächsten Periode fortlaufen kann. Fällt am Ende des gesamten Zeithorizonts die Nutzungsdauer nicht mit dem Ende des Betrachtungszeitraums zusammen, so besitzt die Anlage einen Restwert, der veräußert werden kann.

Für diesen Leitfaden wird folgende Annahmen getroffen, die die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erleichtern: Die Ersatzinvestition erfolgt in der letzten Periode der Nutzungsdauer. Da der Betrachtungszeitraum als ein Vielfaches der Nutzungsdauern für technische Anlagen und EMSR-Technik gewählt ist, entfällt dadurch die Restbarwertbetrachtung. Der Restbarwert ist der auf den Bezugszeitpunkt abgezinste Barwert des Restwerts am Ende des Betrachtungszeitraums.

Weiterhin kann die Höhe der Ersatzinvestition für technische Anlagen als Prozentsatz der Anfangsinvestition abgeschätzt werden. Für weitere Informationen und zur Berechnung des Restbarwertes wird auf die VDI 2067 verwiesen.

### **3.3.3 Betriebskostenschätzung**

#### **3.3.3.1 Energiekosten**

Für die Abschätzung der Energiekosten kann auf das Statistische Bundesamt zurückgegriffen werden, da es fortlaufend die Preise für Erdgas und Strom als halbjährliche, durchschnittliche Gesamtverkaufspreise sowohl für Privathaushalte als auch Nicht-Haushalte erhebt. Zusätzlich werden die Energiekosten nach Verbrauch gestaffelt (von unter 20 MWh bis über 150.000 MWh).

#### **3.3.3.2 Betriebsmittel und P-Rezyklat**

Die Preise für Betriebsmittel und für die P-Rezyklate sollten bestmöglich über globale Marktpreise, Chemie-Preisindizes oder Großhandelspreise bestimmt werden.

#### **3.3.3.3 Personalaufwand**

Die Entlohnung für den Personalaufwand richtet sich nach Entgelttabellen der Tarifverträge für die Wasserwirtschaft bzw. für die Chemieindustrie für die jeweils angesetzte Tätigkeit und der draus folgenden Gehaltsstufe. Der Personalaufwand kann über Vollzeitäquivalente oder über Jahresgehälter erfasst werden.

#### **3.3.3.4 Instandsetzung und Versicherung**

Der Aufwand für Instandsetzung wird prozentual anhand der Investitionskosten für die technischen Anlagen abgeschätzt, als Pauschale kann hier 2 % angenommen, für eine genauere Betrachtung kann der Aufwand für Instandsetzung mittels der Tabellen im Anhang der VDI 2067 ermittelt werden. Für die Versicherung können 1 % von den Gesamtinvestitionskosten angenommen werden.

### 3.3.3.5 Transport/Entsorgungskosten

Die Transportkosten und Entsorgungskosten berechnen sich nach den Kosten pro Kilometer für einen 12 t LKW. Für den Treibstoffpreis wird der Preis für das betrachtete Wirtschaftsjahr gemittelt. Verschleiß, Instandhaltung, Personal etc. werden zur Einfachheit nicht berücksichtigt, sondern die Betrachtung der Transport und Entsorgungskosten erfolgt über die Laufleistung.

- Energiekosten ermitteln sich nach Daten des statistischen Bundesamtes
- Betriebsmittel und P-Produkte orientieren sich an zur Verfügung stehenden Marktpreisen
- Personalaufwand richtet sich nach der Entgelttabelle für die Branchen Wasserwirtschaft und/oder Chemieindustrie
- Instandsetzungs- und Versicherungskosten werden prozentual von Gesamtinvestitionskosten berechnet
- Transport- und Entsorgungskosten richten sich nach jährlicher Laufleistung

## 3.4 Zeiträume

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit ist die Wahl eines geeigneten Betrachtungszeitraums (T) von Bedeutung, da dieser die Grundlage für die Erfassung aller relevanten Kosten und Erlöse bildet und somit maßgeblich die Aussagekraft der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung beeinflusst. Es ist zu beachten, dass sich Effekte der Preissteigerung/-änderung stärker auf das Ergebnis auswirken, je länger der Zeitraum gewählt wird (VDI 2067).

Für wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Bereich der Abwasserreinigung beträgt der Basis-Betrachtungszeitraum 30 Jahre (DWA-Arbeitsgruppe WI-2 2012). Dieser wird bei dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegt.

Eine weitere wichtige Größe für die Betrachtung ist die Nutzungsdauer ( $T_N$ ). Sie ist der Zeitraum, über den ein Vermögensgegenstand oder eine Investition wirtschaftlich genutzt werden kann, bevor er/sie veraltet, abgenutzt oder unwirtschaftlich wird. Da die Nutzungsdauer insbesondere bei neuartigen Verfahren im Voraus nicht genau zu ermitteln oder vorherzusagen ist, wird hier auf betriebliche Nutzungsdauern aus der Literatur zurückgegriffen. Das Arbeitsblatt DWA-A 133 „Wertermittlung von Abwasseranlagen“ liefert hierzu Tabellen für die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauern von unterschiedlichen Anlagen und Vermögensgegenständen. Davon ausgehen ergeben sich Nutzungsdauern für:

- Gebäude von  $T_N = 30$  Jahre (Mindestzeitraum für Betriebsgebäude)
- Technische Anlagen von  $T_N = 15$  Jahre (häufig auftretende Nutzungsdauer für technische Anlagen)
- Elektronik und Messtechnik  $T_N = 5 - 10$  Jahre (auftretende Zeitspanne der Nutzungsdauer für EMSR-Technik)

Die letzte relevante Zeitgröße ist der Bezugszeitpunkt ( $t_0$ ). Unter dem Bezugszeitpunkt versteht man den Zeitpunkt, auf den die anfallenden Zahlungsströme verzinst werden. In der Regel wird die Gegenwart gewählt, da hier alle Zahlungen auf den heutigen Zeitpunkt abgezinst (diskontiert) werden. Sollte der Bezugszeitpunkt in einer zukünftigen Periode liegen, so sind alle Zahlungsströme bis zu diesem Zeitpunkt aufzuzinsen.

### 3.5 Kalkulationszinssatz

Sobald bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterschiedliche Zahlungsströme und -zeitpunkte vorliegen, muss der Zeitwert des Geldes berücksichtigt werden. Den zur Abzinsung einer Zahlungsgröße in der (dynamischen) Investitionsrechnung erforderliche Zinsfuß wird Kalkulationszinssatz oder Kalkulationszinsfuß genannt und ist für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von entscheidender Bedeutung. Der Kalkulationszinssatz kann als ein Vergleichszinssatz verstanden werden (VDI 6025) und dient in seiner Hauptfunktion als Bewertungsmaßstab für die Vorteilhaftigkeit einer Investition (Noosten 2018).

Die Bestimmung des Kalkulationszinssatzes ist mit Unsicherheiten verbunden, da es i. d. R. nicht möglich ist, genau Vorhersagen über den Finanzmarkt zu machen. Daher werden unter der Bedingung eines unvollkommenen Kapitalmarkts von einem näherungsweise Kalkulationszinssatz ausgegangen:

- In der Leitlinie der dynamischen Kostenvergleichsrechnung der LAWA wird ein „Zinssatz von real 3 % p.a. als Standardwert zu Grunde“ gelegt. Davon ausgehend werden hinsichtlich der Sensitivitätsanalyse „eine Bandbreite von 2 % bis höchstens 5 % p.a. verwendet“ (Noosten 2018).
- Ein anderer möglicher Ansatz zur Bestimmung des Kalkulationszinses ist die Approximation bzw. die Orientierung anhand festverzinslicher Wertpapiere inländischer Emittenten. Die Gemeindeprüfanstalt Nordrhein-Westfalen – Anstalt des öffentlichen Rechts – bestimmt jedes Jahr kalkulatorische Zinsen anhand Anleihen der öffentlichen Hand neu (berechneter Wert für 2025: 2,9033 %; Stand: März 2024)

### 3.6 Preisänderungsraten

Alle Preise und Kosten unterliegen Unsicherheiten, Schwankungen, Trends und Inflation. Angemessene Aussagen über die Entwicklung von Preisveränderungen zu tätigen, ist mit erheblichem Aufwand verbunden und erfordert ausführliche Analysen ohne Garantie auf präzise Aussagen. Aus diesem Grund werden Preisveränderungen anhand der Inflationsrate abgeschätzt, die vom statistischen Bundesamt angegeben wird. Für die Sensitivitätsanalyse können spezifische Annahmen zur Preisentwicklung getroffen werden (z.B. erhöhte Nachfrage der P-Rezyklate, Marktpreiserhöhungen/-senkungen für Betriebsmittel etc.).

- Zeiträume ergeben sich aus Erfahrungswerten und Kenndaten der Wasserwirtschaft
- Kalkulatorische Zinsen werden über öffentliche Stellen ermittelt, die Schwankungsbreite für die Sensitivitätsanalyse beträgt 2 bis 5 %
- Preisänderungsraten werden über die Inflation abgeschätzt und berücksichtigt

## 4 Durchführen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Projekten und Vorhaben wird in der Investitionsrechnung zwischen statischen und dynamischen Verfahren unterschieden. Der wesentliche Unterschied der beiden Verfahren besteht darin, dass bei statischen Verfahren zeitlich unterschiedlich anfallende Ein- und Auszahlungen nicht berücksichtigt werden und somit nicht der Zeitwert des Geldes. Eine Auflistung der verschiedenen Verfahren ist Tabelle 2 zu entnehmen.

**Tabelle 2: Statische und dynamische Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung (Noosten 2018)**

<b>Statische Verfahren</b>	Kostenvergleichsrechnung
	Gewinnvergleichsrechnung
	Rentabilitätsrechnung
	Statische Amortisationsrechnung
<b>Dynamische Verfahren</b>	Kapitalwertmethode
	Interne Zinsfußmethode
	Annuitätenmethode
	Vollständige Finanzpläne
	Dynamische Amortisationsrechnung

Die Wahl des Verfahrens hängt von unterschiedlichen Faktoren ab wie z.B. der zur Verfügung stehenden Information oder von Ziel- und Nutzenanforderungen des Entscheiders. Eine absolute Vorteilhaftigkeit der Investition liegt dann vor, wenn die Durchführung zu der Erreichung der Ziele des Entscheiders beiträgt. Eine relative Vorteilhaftigkeit ist gegeben, wenn eine Investitionsalternative wirtschaftlicher ist als eine andere. Ziel ist vornehmlich die Untersuchung der absoluten Vorteilhaftigkeit. Für integrierte Verfahren der P-Rückgewinnung ist auch die relative Vorteilhaftigkeit interessant, hier wäre eine Vergleichbarkeit mit sich selbst möglich (z.B. Auswirkungen auf die Schlammmentwässerung durch die MAP-Gewinnung).

Dieser Leitfaden beschäftigt sich mit der Kapitalwert- und der Annuitätenmethode für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, da sie sich in der Praxis als verlässliche Methoden zur Beurteilung von Investitionsentscheidungen bewährt haben. Die Ergebnisse dieser beiden Methoden sind die Hauptbewertungskriterien, auf die sich in diesem Leitfaden konzentriert wird. Es ist dem Anwender natürlich freigestellt, die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung um zusätzliche Methoden zu erweitern (z.B. Amortisationsrechnungen, Break-Even-Analyse, etc.).

Anmerkung: In der Wasserwirtschaft wird in der Regel die dynamische Kostenvergleichsrechnung (KVR-Richtlinie) für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verwendet. Da es sich bei wasserwirtschaftlichen Maßnahmen jedoch in der Regel um nicht gewinnorientierte Projekte handelt, werden nur die Kosten betrachtet mit dem Ziel, die kostengünstigste Lösung zu finden. Somit kann nur eine Aussage über die relative Vorteilhaftigkeit getroffen werden. Die Berechnung der Kosten in der KVR-Richtlinie erfolgt wie die hier vorgestellte Methode über Barwerte, mit dem Unterschied, dass hier zusätzlich die Erlöse aus dem P-Recycling betrachtet werden.

### 4.1.1 Kapitalwertmethode

Eine Investition löst unterschiedliche Zahlungsströme ( $Z_n$ ) zu unterschiedlichen Zeitpunkten ( $t_n$ ) über den Betrachtungszeitraum ( $T$ ) aus. Aus diesem Grund ist ein direkter Vergleich und die Verrechnung dieser Zahlungen miteinander nur unter Berücksichtigung von Zinsen möglich. Um dies zu ermöglichen, müssen die Zahlungen auf einen Bezugszeitpunkt entweder auf- oder abgezinst werden. Bei der Kapitalwertmethode werden alle zukünftigen Ein- und Auszahlungen auf den Zeitpunkt  $t = 0$  (Gegenwart) bezogen. Diese auf den heutigen Zeitpunkt abgezinsten Zahlungen nennt man Barwerte (engl. Present Value, PV). Die Summe aller Barwerte ist der Kapitalwert (Net Present Value, NPV) (vgl. Abbildung 4-1:)

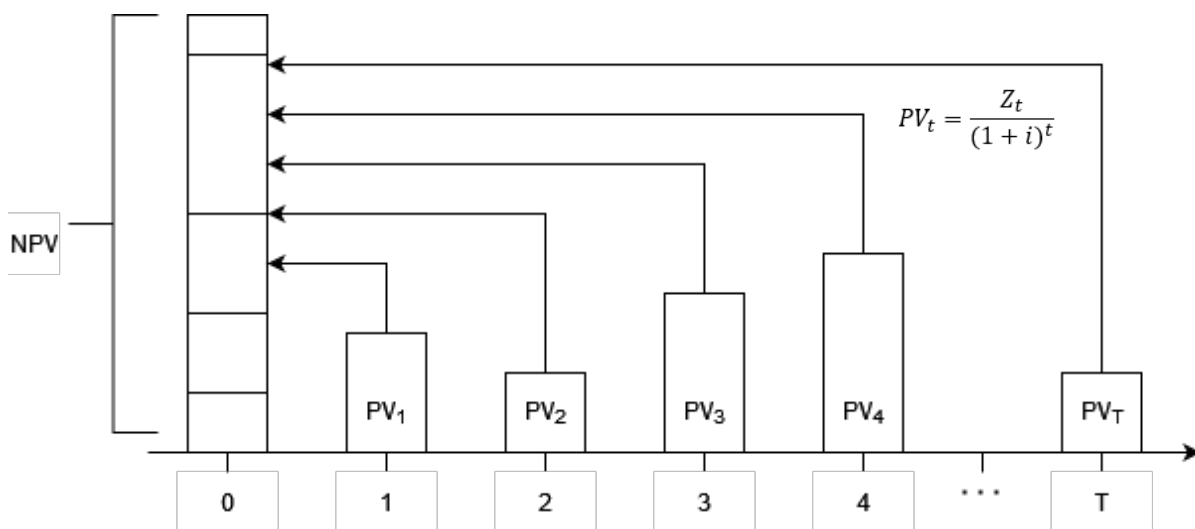


Abbildung 4-1: Graphische Darstellung der Kapitalwertmethode

Mit dem Umstand, dass am Anfang eine Investitionszahlung ( $I_0$ ) (i.v.F. Investitionsausgaben z.B. Gebäude, Anlagen etc.) zu leisten ist, und der Annahme, dass es zu keinem Liquiditätserlös (Restbarwert) nach Ende des Betrachtungszeitraums kommt, errechnet sich der Kapitalwert zu:

$$K = -I_0 + \sum \frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} = -I_0 + \sum \frac{Z_t}{(1+i)^t}$$

Mit:

K = Kapitalwert  
 $I_0$  = Anfangsinvestition  
 $E_t$  = Einzahlungen  
 $A_t$  = Auszahlungen  
 $Z_t$  = Zahlungsstrom  
 $i$  = Kalkulationszinssatz  
 $t$  = Periode

Die Entscheidungsregel nach Anwendung der Kapitalwertmethode lautet:

- $K > 0$ : Ergibt sich ein positiver Kapitalwert, so ist die Investition vorteilhaft (wirtschaftlich). → Bei Durchführung der Investition werden mehr als die investitionsbedingten Auszahlungen und die erwartete Verzinsung erwirtschaftet.
- $K = 0$ : Ergibt sich ein Kapitalwert von Null, ist die Investition weder wirtschaftlich und unwirtschaftlich. → Indifferenz
- $K < 0$ : Ergibt sich ein negativer Kapitalwert, so ist die Investition unvorteilhaft (unwirtschaftlich). → Bei Durchführung der Investition werden nicht genügend Erträge erzielt, um die investitionsbedingten Auszahlungen und die erwartete Verzinsung zu decken.

#### 4.1.2 Annuitätenmethode

Bei der Annuitätensmethode werden unregelmäßige Zahlungen sowie Zahlungen mit variierenden Beträgen über einen bestimmten Zeitraum in gleichbleibende, regelmäßige Zahlungen umgewandelt.

Die Berechnungsmethode ermöglicht es, unterschiedliche Zahlungsströme aus verschiedenen Perioden gemeinsam zu verrechnen. Zum Beispiel werden die Investitionsausgaben (Anschaffungsauszahlungen) und variable laufende Zahlungen durch den Annuitätenfaktor ( $a$ ) in gleichmäßige, durchschnittliche Zahlungen über den Betrachtungszeitraum ( $T$ ) umgewandelt (vgl. Abbildung 4-2).

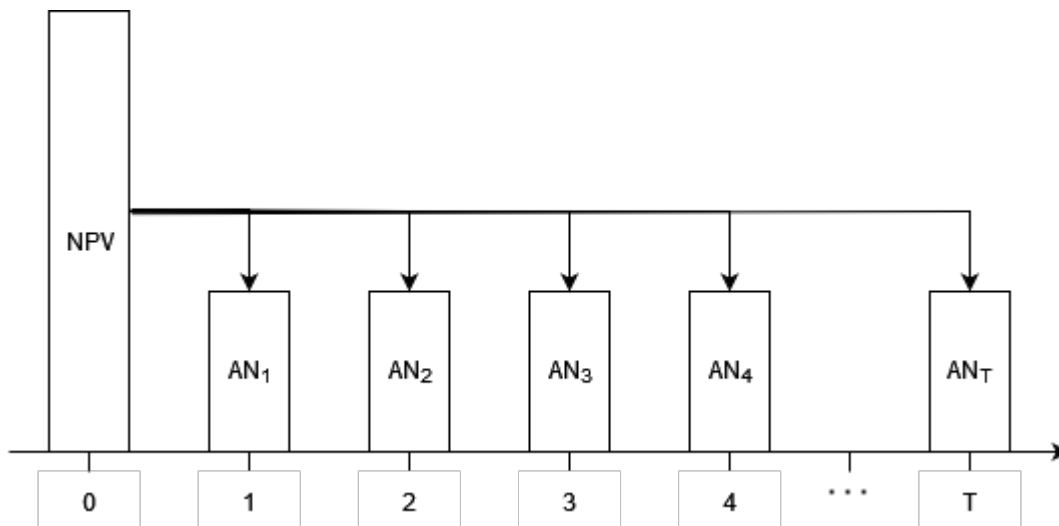


Abbildung 4-2: Graphische Veranschaulichung der Annuitätenmethode

Die Berechnung der Annuität bestimmt sich wie folgt:

$$AN = K \times \frac{(1+i)^T \times i}{(1+i)^T - 1} = K \times a$$

Mit:

- K = Kapitalwert
- AN = Annuität
- T = Betrachtungszeitraum
- a = Annuitätenfaktor
- i = Kalkulationszinssatz

Die Entscheidungsregeln entsprechen denen der Kapitalwertmethode:

- $AN > 0$ : Die Investition ist wirtschaftlich.
- $AN = 0$ : Indifferenz bezüglich der Investition.
- $AN < 0$ : Die Investition ist unwirtschaftlich.

Der **Kapitalwert [€]** gibt den unternehmerischen Erfolg an, der durch die Investition bzw. das Projekt über den gesamten Betrachtungszeitraum erwirtschaftet werden kann. Hierzu wird die ganze Zahlungsreihe auf einen gesamten Barwert durch Diskontierung bezogen.

Die **Annuität [€/a]** wandelt unterschiedliche Zahlungen (oder auch den Kapitalwert) in periodisch gleichbleibende Zahlungen über den Betrachtungszeitraum um.

## 5 Szenario- und Sensitivitätsanalyse

Sensitivitätsanalysen sind ein wesentliches Instrument in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, um den Einfluss von Unsicherheiten und Schwankungen der zugrunde liegenden Annahmen auf das Projekt bzw. die Investition zu bewerten. Sensitivitätsanalysen ermöglichen es, die Auswirkungen von Änderungen wesentlicher Schlüsselfaktoren auf das Projektergebnis zu verstehen bzw. die Schlüsselfaktoren zu erkennen und somit fundiertere Entscheidungen zu treffen. Dabei wird untersucht, welche Auswirkungen die Veränderung unterschiedlicher Werte unabhängiger Variablen auf das Gesamtergebnis hat.

Durch die Kostenschätzung nach der DIN 276 ergibt sich eine Genauigkeit für die Investitionskosten von  $\pm 40\%$  für Ebene 1 bzw.  $\pm 30\%$  für Ebene 2, somit können drei Szenarien für die Wirtschaftlichkeit hinsichtlich des Investitionsaufwandes abgeleitet werden:

- „Neutral“: Ermittelte Kosten + 0 %
- „Best Case“: Ermittelte Kosten – 35 %
- „Worst Case“: Ermittelte Kosten +35 %

Bei der Sensitivitätsanalyse soll der Einfluss der Parameter untersucht werden, die sich relevant auf die Zahlungsströme auswirken, sowie signifikanten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. Hierfür sollen kritische Faktoren identifiziert werden, darunter der Einfluss von Gesteigungskosten (z.B. Annahme von effizienteren Prozessen bzw. Produktion), Markt- und Preisschwankungen sowohl für P-Rezyklate als auch Betriebsmittel, Einfluss von Preisänderungen für betriebsgebundene Kosten (Strom, Wasser, Wärme), Auswirkungen von Zinsen und Preisänderungsraten, usw.

Bei der einfachen Sensitivitätsanalyse wird jede Variable einzeln variiert, während alle anderen Variablen konstant gehalten werden. Hierdurch kann der Umfang des Einflusses einzelner Größen auf das Ergebnis ermittelt werden. Im Vergleich dazu werden bei der Szenarioanalyse mehrere Kombinationen von Veränderungen der Variablen betrachtet, um realistische Szenarien zu simulieren (hier: Kombination aus Best-Case- und Worst-Case-Szenarien der Investitionskosten schwankungsbreite und Parameterbetrachtung).

- Bei der Szenarioanalyse werden für den **Best-Case** die Investitionskosten um 35 % verringert.
- Bei der Szenarioanalyse werden für den **Worst-Case** die Investitionskosten um 35 % erhöht.
- Bei der Sensitivitätsanalyse sollen Auswirkungen von kritischen Parametern auf die Wirtschaftlichkeit untersucht werden. Hierzu sollen Annahmen zu Kosten- und Preisentwicklungen getroffen werden.

## 6 Beispiel einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Folgenden wird ein Beispiel zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit dargestellt. Es handelt sich hierbei um fiktive Werte und Zahlen einer P-Recycling Anlage, die die Berechnung veranschaulichen sollen. Die Investitionskosten werden nach der Tabelle der DIN 276 aufgeschlüsselt (siehe Abbildung 3-1), während für die weiteren Kostenarten und Erlöse Gesamtsummen angenommen werden.

Für die Beispielanlage werden folgende Annahmen getroffen:

- Die EMSR-Kosten erhalten einen Nutzungszeitraum von 10 Jahren und werden mit 20 % von den Kosten für die technischen Anlagen (KG400) abgeschätzt.
- Die Höhe der Ersatzinvestition für technische Anlagen (TA) beträgt 40 %, für EMSR 50 %.
- Die Preisänderung wird für pauschal mit 2 % Inflation angenommen.
- Der Kalkulationszinssatz wird zu 3 % bestimmt.

Weiterhin gilt ein Betrachtungszeitraum von  $T=30$  Jahren, sowie der Nutzungszeitraum der technischen Anlagen von  $T_{N,TA}=15$  Jahre und für das Bauwerk  $T_{N,BW}=30$  Jahre.

Die Abbildung 6-1 zeigt die Gliederung der Investitionskosten nach den DIN 276. Wie im Leitfaden beschrieben sind die Kosten für die KG 300 – Bauwerk als Gesamtkosten - geschätzt worden, während die Kosten für die KG 400 – Technische Anlagen - detaillierter angegeben sind. Die Betriebskosten werden anhand des ausgelegten Jahresverbrauches geschätzt und mit den jeweiligen Marktpreisen verrechnet. Analog dazu ergeben sich die Erlöse.

Bei den sonstigen Kosten ergeben sich die Wartungs- und Versicherungskosten als Prozentsatz der Investitionskosten. Für die Transport- bzw. Entsorgungskosten werden die jährlich anfallenden Kosten über den Spritpreis und die Fahrleistung ermittelt.

Die Gesamtkostenaufstellung des Beispiels zeigt Tabelle 3.

Nach Bestimmung aller fixer Zahlungen und der jährlichen Zahlungsströme wird in Kapitel 6.1 der Kapitalwert und in Kapitel 6.2 die Annuität berechnet.

Investitionskosten nach DIN 276		
KG Nr.	Kostengruppe	Netto
200	Vorbereitende Maßnahmen - Zwischensumme	- €
300	Bauwerk (Baukonstruktionen) - Zwischensumme	250.000 €
KG	Gliederung	
410	Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen	80.000 €
420	Wärmeversorgungsanlagen	70.000 €
430	Raumlufttechnische Anlagen	50.000 €
440	Elektrische Anlagen	60.000 €
450	Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen	20.000 €
460	Förderanlagen	40.000 €
470	Nutzungsspezifische und verfahrenstechnische Anlagen	80.000 €
480	Gebäude- und Anlagenautomation	70.000 €
490	Sonstige Maßnahmen für technische Anlagen	30.000 €
400	Bauwerk (Technische Anlagen) - Zwischensumme	500.000,00 €
500	Außenanlagen u. Freiflächen - Zwischensumme	- €
600	Ausstattung u. Kunstwerke - Zwischensumme	- €
700	Baunebenkosten - Zwischensumme	- €
800	Finanzierung - Zwischensumme	- €
<b>SUMME</b>		<b>750.000,00 €</b>

Abbildung 6-1: Investitionskosten aufgeschlüsselt nach der DIN 276 - Kosten im Bauwesen

Tabelle 3: Kostenpunkte zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit

Kostenpunkt	Einheit	Wert
EMSR-Technik	EUR	100.000
Betriebskosten	EUR/a	70.000
Betriebsmittel	EUR/a	50.000
Sonstige Kosten	EUR/a	35.000
Erlöse	EUR/a	170.000

Die relevanten Zahlungen bzw. Zahlungsströme ergeben sich zu:

- Anfangsinvestition  $I_0 = 750.000\text{€} + 100.000\text{€} = 850.000\text{€}$
- Ersatzinvestition TA = 200.000€
- Ersatzinvestition EMSR = 50.000€
- Jährliche Auszahlungen  $A_t = 70.000\text{€} + 50.000\text{€} + 35.000\text{€} = 155.000\text{€}$
- Jährliche Einzahlungen  $E_t = 170.000\text{€}$
- Zahlungsstrom  $Z_t = 170.000\text{€} - 155.000\text{€} = 15.000\text{€}$

## 6.1 Kapitalwertberechnung

Für die Berechnung des Kapitalwertes stehen in Excel zwei mögliche Varianten zur Auswahl.

### Methode 1: Manuelle Berechnung

Bei der manuellen Berechnung erfolgt die Berechnung des Kapitalwertes, in dem man alle Perioden mit ihren Zahlungsströmen abbildet, anschließend diskontiert und die Summe der Zahlungen bildet.

$$K = -850.000 + \frac{15.000 \cdot 1,02}{1,03} + \dots + \frac{(15.000 - 50.000) \cdot 1,02^{10}}{1,03^{10}} + \dots + \frac{(15.000 - 200.000) \cdot 1,02^{15}}{1,03^{15}} + \dots + \frac{15.000 \cdot 1,02^{30}}{1,03^{30}} = -721.034 \text{ €}$$

### Methode 2: Excel-Formel

Bei der zweiten Methode kommt die NBW-Formel (Nettobarwert, engl. Net Present Value – NPV) zum Einsatz. Hierfür ist der Zahlungsstrom des Betrachtungszeitraumes nötig. Die Formel rechnet nach Eingabe des Zinses und des Zahlungsstromes den Barwert der Zahlungsreihe aus. Wichtig zu beachten ist, dass die Anfangsinvestition manuell subtrahiert werden muss um den Kapitalwert zu erhalten.

$$= \text{NBW}(3\%; \text{Summe der Zahlungen von } t=1 \text{ bis } T=30) - 850.000\text{€}$$

## 6.2 Annuität

Wie bei der Kapitalwertmethode gibt es auch hier die gleichen Möglichkeiten zur Berechnung der Annuität in Excel.

### Methode 1: Manuelle Berechnung

Da sich die Annuität aus der Multiplikation des Kapitalwertes mit dem Annuitätenfaktor ergibt, kann die Berechnung händisch wie folgt errechnet werden:

$$a = \frac{(1,03)^{30} \cdot 0,03}{(1,03)^{30} - 1} = 0,0510$$

$$AN = -721.034 \cdot 0,0510 = 36.787 \text{ €}$$

## Methode 2: Excel Formel

Die Formel für die Berechnung in Excel lautet RMZ (regelmäßige Zahlungen):

=RMZ(3%;Betrachtungszeitraum T=30;Kapitalwert)

### **6.3 Excel-Tool als Berechnungshilfe für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Als Anlage zu diesem Leitfaden wurde ein Excel-Tool als Berechnungshilfe für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Anlagen der Phosphorrückgewinnung entwickelt. Die Nutzung des Excel-Tools wird in einem eigenen ReadMe-Tabellenblatt erläutert.

Das Excel-Tool verwendet zur Orientierung eine Farbcodierung. Es wird zwischen Eingabe-/ "Manipulations"-Feldern und einfachen Kategoriefeldern unterschieden. Manipulationsfelder erlauben eigene Eingaben oder die Auswahl verschiedener Optionen mit Drop-Down Feldern. Die Farbcodierung der Kategoriefelder unterscheidet zwischen Investitionskosten, Betriebskosten bzw. -mittel, Erlöse, Abschreibung und sonstige Kosten. Das Excel-Tool ist in mehrere Tabellenblätter unterteilt:

Im **Tabellenblatt Input** werden die Eingangsdaten der Berechnung eingegeben. Hierbei ist zunächst der Verfahrenstyp auszuwählen. Für ein integriertes Verfahren der P-Rückgewinnung gilt "Ausbaugrad", für nachgeschaltete Verfahren "KSA-Menge". Es gibt die Möglichkeit die Skalierungsoption vorzugeben. Investitionskosten werden dabei degressiv und Betriebskosten proportional skaliert. Die Investitionskosten sind nach Orientierung an die DIN 276 einzugeben. Es ist nicht verlangt die DIN 276 Tabelle exakt auszufüllen - zur Vollständigkeit steht jedoch die gesamte Kostenschätzung nach Ebene 2 zur Verfügung. Es ist auch nicht erforderlich die Kostenpositionen der KG400 akkurat nach ihrer Bezeichnung auszufüllen. Die vorhandenen Einträge können durch eigene Eingaben verändert und angepasst werden. Die Kostengliederung soll verdeutlichen, dass Kosten nach KG400 nach Möglichkeit detailliert erfasst werden sollen. Im Excel-Tool hinterlegte Preise für Betriebskosten können durch eigene Angaben ersetzt werden, wenn eigenständige Preisrecherchen durchgeführt worden sind. Die hinterlegten Betriebsmittel sind exemplarisch gelistet. Auch hier können hinterlegte Vorgaben mit eigenen Angaben ergänzt bzw. angepasst werden. Unter sonstige Kosten sind Angaben zu den Entsorgungskosten/Transportkosten über das Tabellenblatt "Randbedingungen" zu ändern. Änderungen zu Versicherungs- und Instandsetzungskosten sind über das Drop-Down Menü vorzunehmen. Angaben zu Erlösen des Primärprodukts und ggf. weiterer Sekundärprodukte sind durch eigene Schätzungen vorzunehmen. Abschreibungen sind nicht in dem Tabellenblatt enthalten, sondern ergeben sich aus Angaben im Tabellenblatt Randbedingungen.

Im **Tabellenblatt Randbedingungen** können die hinterlegten Angaben zu Zeithorizonten, Reinvestitionshöhen, Änderungsraten für Preisentwicklungen, Kalkulationszinssatz und Entsorgungs-/Transportkostenbedingungen auf die spezifischen Projekt-Randbedingungen angepasst werden.

Im **Tabellenblatt Zusammenfassung** sind alle Kostenangaben zur Prüfung zusammengefasst. Die Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterschiedlicher Szenarien werden im **Tabellenblatt Ergebnisse** ausgegeben.

Im **Tabellenblatt Sensitivitätsanalyse** können Kostenentwicklungen anhand unterschiedlicher Variablen und Szenarien untersucht werden. Die Sensitivitätsanalyse erfolgt dabei durch die (prozentuale) Veränderung von Betriebskosten, Erlösen und Entsorgungs-/Transportkosten. Kalkulationszinssatz und Preisänderungsrate können verändert werden, auch ist eine Szenarioanalyse anhand der Schwankungsbreite der Investitionskosten möglich.

In den **Tabellenblättern Wirtschaftlichkeit (Neutral), Wirtschaftlichkeit (Positiv) und Wirtschaftlichkeit (Negativ)** werden diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ohne und mit Investitionsschwankungsbreite von -35 % bzw. +35 % dargestellt.

Das vorgelegte Excel-Tool soll allen Verbundvorhaben der Fördermaßnahme RePhoR als Berechnungshilfe für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für Anlagen der Phosphorrückgewinnung dienen. Die Autoren des Leitfadens freuen sich auf Rückmeldungen zur Anwendbarkeit des Excel-Tools und hoffen, die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der untersuchten Verfahren mit den Verbundpartnern diskutieren zu können.

## 7 Literaturverzeichnis

DIN 276, 2018: Kosten im Bauwesen.

DIN EN 60300-3-3, 2014: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten.

DWA-Arbeitsgruppe WI-2 (2012): Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen. (KVR-Leitlinien). 8. Aufl. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall.

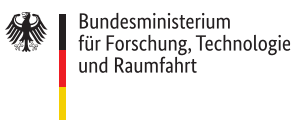
DWA-Arbeitsgruppe WI-2 (2021): Arbeitsblatt DWA-A 133: Wertermittlung von Abwasseranlagen. Systematische Erfassung, Bewertung und Fortschreibung. 1. Auflage. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, A 133).

Noosten, D. (2018): Investitionsrechnung. Eine Einführung für Architekten und Bauingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien, Wiesbaden.

VDI 2067, 2012: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.

VDI 6025, 2012: Betriebswirtschaftliche Berechnungen für Investitionsgüter und Anlagen.

Gefördert durch:



[www.bmbf-rephor.de](http://www.bmbf-rephor.de)