



1. Einleitung

1.1. Motivation

Moderne Scheinwerfersysteme leisten einen erheblichen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr [91], [115], [127], [125]. Gleichzeitig bieten sie vom Kunden direkt wahrnehmbare Funktionen. Während in der Vergangenheit noch mit Homogenität, Helligkeit und Öffnungswinkel der generierten Lichtverteilungen insbesondere optische Kriterien entscheidend gewesen sind [61], spielt heute auch die Performanz der fahrerassistierenden Lichtfunktionen wie adaptive Lichtverteilungen eine große Rolle [91], [36], [91], [127]. Die zunehmende Anzahl der lichtbasierten Assistenten schlägt sich auch in der Fahrzeugvernetzung nieder. So werden hochentwickelte Scheinwerfer-Elektrik/Elektronik-Systeme mittels performanter CAN-Busse realisiert, deren Kanalkapazitäten insbesondere durch sogenannte Matrix-Scheinwerfer stark ausgereizt werden [176]. Diese Technologie erlaubt eine Segmentierung der Lichtverteilung und damit die Nutzung eines Dauerfernlichts durch blendfreie Maskierung anderer Verkehrsteilnehmer [62], [18], [12].

Die Ausleuchtbereiche der Segmente heutiger Matrix-Scheinwerfer sind mit über 1,2° grob und blenden zumeist einen größeren Bereich aus, als es notwendig wäre. Außerdem ist das Schalten der Segmente in dynamischen Situationen deutlich wahrnehmbar. Aus diesen Gründen gibt es Bestrebungen, die Matrixauflösung zu erhöhen [111], [72], [70]. Ebenso denkbar wird auch ein Entfall jeglicher Stellmotoren im Scheinwerfer, die Entwicklung neuartiger fahrerassistierender Lichtfunktionen, Personalisierung und Kommunikation zwischen dem Fahrzeugsystem und anderen Verkehrsteilnehmern sein [77].

Eine Erhöhung der Segmentanzahl erfordert nicht nur neuartige Ansätze zur Lichtgenerierung, sondern bringt auch Herausforderungen in der Fahrzeugvernetzung und der Verteilung ressourcenintensiver Funktionen auf teilnehmende E/E-Komponenten mit sich. Der aktuelle Trend zur Hochintegration von Softwaremodulen in leistungsfähige Rechneinheiten führt zu einer zentralen E/E-Architekturauslegung mit hohem Datenaufkommen zwischen den Steuergeräten, dem man insbesondere durch Automotive-Ethernet-Kommunikation begegnet [94], [105]. Doch auch eine dezentrale E/E-Architektur ist je nach Rahmenbedingungen sinnvoll.

Die Auswahl einer E/E-Architektururlösung erfordert eine Entscheidungsmethode, die es erlaubt, verschiedene Einflusskriterien zu gewichten, mögliche Alternativen zu erarbeiten und sie anschließend nach wesentlichen Kriterien mit Ausprägungen variierender Skalen zu vergleichen. Allerdings ist für derartige Untersuchungen bisher kein definierter Prozess im Entwicklungsablauf bekannt. Da die Auswirkungen einer



Fehlentscheidungen hohe Kosten, Funktionseinschränkungen und Änderungen während der Entwicklung nach sich ziehen können, sind im Vorfeld ausgiebige Evaluierungen notwendig. Sie schließen nicht nur die Funktionsverteilung und die daraus folgende Vernetzung, sondern auch die konkrete Umsetzung wichtiger Komponenten mit ein.

1.2. Ziel und Struktur der Arbeit

Der Mangel einer E/E-Architektur für hochauflösende Scheinwerfersysteme soll mit dieser Arbeit behoben werden. Hierzu ist ein Entscheidungsprozess zur Auswahl einer optimalen Architektur auszusuchen und anzuwenden. Um eine Entscheidung herbeizuführen, ist eine multikriterielle Analyse der Lösungsvarianten durchzuführen. Dafür sollen Anforderungen eines hochauflösenden Scheinwerfersystems an die beteiligten Recheneinheiten, die Vernetzung und die E/E-Komponenten ausgearbeitet sowie entscheidende Kriterien untersucht werden. Eine Lösungsvariante ist prototypisch umzusetzen und nach ausgewählten Kriterien zu evaluieren.

Kapitel 2 führt den Stand der Technik ein. So werden unter anderem Grundlagen der Optik, die lichtemittierende Diode und die Entscheidungstheorie mit Bewertungsverfahren vorgestellt. Anschließend wird näher auf die Entwicklung von Fahrzeugarchitekturen und Lichtfunktionen moderner Scheinwerfersysteme eingegangen. Abschließend werden Untersuchungsfelder dieser Arbeit zur Abgrenzung vom Stand der Technik benannt.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit der Definition eines hochauflösenden Scheinwerfers, möglichen Basistechnologien für ihre Umsetzung sowie mit der Sensor-Aktor-Wirkkette mit Alternativen der Funktionsverortung. Außerdem werden Ansteuerungsprinzipien von LED-Lichtquellen präsentiert.

Kapitel 4 bildet den Kern der Anforderungsevaluierung hochauflösender Scheinwerfersysteme. Zu Beginn wird eine Simulationsumgebung vorgestellt, mittels derer ein Vergleich von drei Scheinwerferauflösungen in einer Maskierungssituation durchgeführt wird. Dabei wird das Potenzial höher aufgelöster Systeme, aber auch das Risiko von Ansteuerungslatenzen evaluiert. Für einen Realitätsbezug wird ein aktuell sich auf dem Markt befindendes System als Referenz untersucht. Einer darauffolgenden quantitativen Anforderungsanalyse hochauflösender Scheinwerfer an die E/E-Architektur folgt eine Parallelisierbarkeitsuntersuchung ressourcenintensiver Funktionsanteile. Zur Reduktion der zu übertragenden Datenmenge in einer zentralen Architektur werden Datenkomprimierungsmethoden auf ihre Leistungsfähigkeit bei der spezifischen Anwendung analysiert. Zum Schluss folgt eine Potenzialabschätzung einer Vernetzung mittels CAN-FD mit Bestimmung maximal ansteuerbarer Segmentanzahl eines Matrix-Scheinwerferpaars.

Eine Integration eines LCD-Scheinwerfers in ein Entwicklungsfahrzeug wird in Kapitel 5 beschrieben. Dabei wird eine Vernetzung auf Basis von Ethernet realisiert und eine Methode zur energieeffizienten Ansteuerung der LED-Hintergrundbeleuchtung mittels lokaler Dimmung bewertet.



Als Alternative zu hochauflösenden Scheinwerfern wird auch ein Demonstrator für einen LED-Matrix-Scheinwerfer vorgestellt und evaluiert, mit dem eine höhere Segmentanzahl als in heutigen Scheinwerfern ermöglicht wird und dennoch die Energieeffizienz hoch bleibt. Zum Abschluss wird die Leistungsfähigkeit des entwickelten HDSW-Übertragungsprotokolls untersucht.

Kapitel 6 handelt von der durchgeführten Probandenstudie zur Untersuchung mehrerer Latenz- und Komprimierungseinflüsse auf die Wahrnehmung realitätsnah projizierter hochauflösender Lichtverteilungen.

In Kapitel 7 werden alle Erkenntnisse dazu genutzt, aufgestellte Architekturalternativen mittels des AHPs nach entscheidungskritischen Kriterien zu bewerten. Als letzter Punkt wird ein Vorschlag für eine Funktionsverteilung einer Scheinwerfer-E/E-Komponente in einer Serienumsetzung erarbeitet.

Es folgen eine abschließende Ergebnisdiskussion und ein Ausblick auf weitere Forschungsfelder im Bereich der Lichtassistenzsysteme in Kapitel 8.

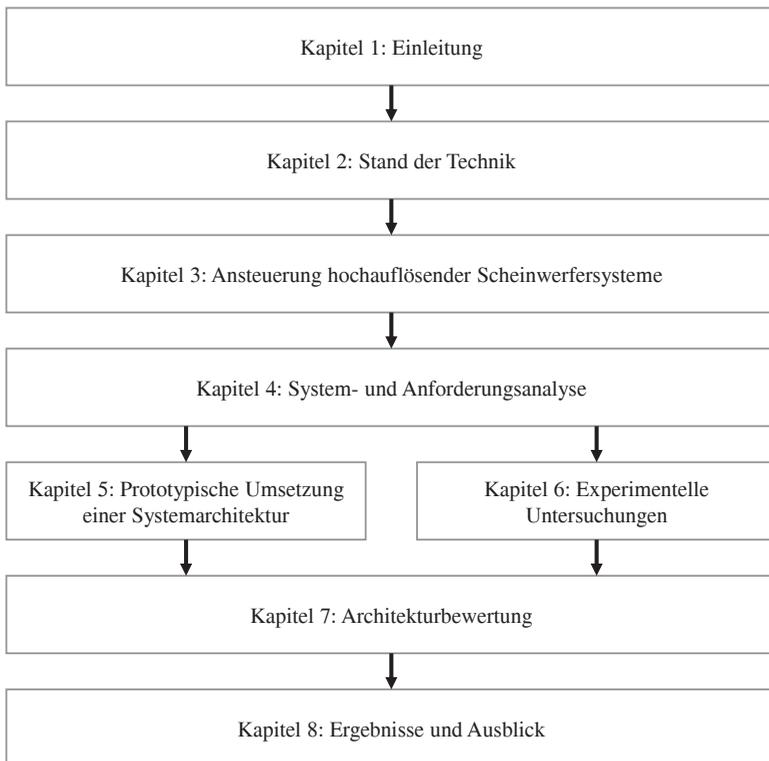


Abbildung 1.1.: Struktur der Arbeit





2. Stand der Technik

2.1. Elektrooptische Grundlagen

2.1.1. Optische Messgrößen

Unter Licht versteht man den vom Menschen sichtbaren Anteil des elektromagnetischen Spektrums mit der Wellenlänge von 380 bis 780nm. Die Empfindlichkeit des menschlichen Auges für Strahlung im sichtbaren Wellenbereich beschreibt die $V(\lambda)$ -Kurve¹ [54]. Eine elektrooptische Lichtquelle wandelt elektrische Leistung zumindest teilweise in einen sichtbaren Lichtstrom Φ_v ($[\Phi_v] = \text{lm}$) mit der Lichtausbeute² η_v um:

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{P}, \quad [\eta_v] = \frac{\text{lm}}{\text{W}} \quad (2.1)$$

Um eine Lichtquelle differenzierter zu beschreiben, kann die abgestrahlte richtungsabhängige Lichtstärke I_v als photometrische Größe verwendet werden. Sie wird als abgegebener Lichtstrom je Raumwinkel Ω angegeben, der wiederum als Quotient der durchstrahlten Teilfläche einer Kugeloberfläche A_{sp} und des Abstands r im Quadrat definiert ist. Damit ist der Raumwinkel mathematisch einheitslos. Ihm wird dennoch die Einheit $[\Omega] = \text{sr}$ (Steradian) zur Abbildung einer physikalischen Größe zugeordnet:

$$\Omega = \frac{A_{sp}}{r^2} \quad (2.2)$$

$$I_v = \frac{\partial \Phi_v}{\partial \Omega}, \quad [I_v] = \frac{\text{lm}}{\text{sr}} = \text{cd} \quad (2.3)$$

Die Leuchtdichte L_v beschreibt ähnlich wie die Lichtstärke die je Winkel abgestrahlte Lichtmenge, gibt diese jedoch je Flächeneinheit der Lichtquelle an. Damit eignet sie sich als Größe zur Beschreibung ausgedehnter Lichtquellen, die nicht durch eine Punktquelle angenähert werden können. Die Richtungsabhängigkeit wird durch die mit $\cos(\alpha)$ verändernde Leuchtflächengröße beschrieben:

$$L_v = \frac{\partial I_v}{\partial A_q \cdot \cos(\alpha)} = \frac{\partial^2 \Phi_v}{\partial \Omega \cdot \partial A_q \cdot \cos(\alpha)}, \quad [L_v] = \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} = \text{nt} \quad (2.4)$$

¹ $V(\lambda)$ -Kurve ist experimentell ermittelt und gibt eine mittlere Empfindlichkeit des menschlichen Auges auf Strahlung bestimmter Wellenlänge λ wieder. Sie verändert sich in Abhängigkeit von der Hell-Dunkel-Adaption des Auges.

²engl.: luminous efficacy.

Entsprechend der auf Raumwinkel bezogenen Lichtstärke wird auch die flächenbezogene Beleuchtungsstärke E_v verwendet. Da eine Fläche inhomogen durch die Lichtquelle ausgeleuchtet werden kann, wird auch hier die differenzielle Schreibweise verwendet:

$$E_v = \frac{\partial \Phi_v}{\partial A_s} = \frac{I_v \partial \Omega}{\partial A_s} = \frac{I_v}{r^2}, \quad [E_v] = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx} \quad (2.5)$$

Bereits heute verfügbare Fahrzeugscheinwerfer leisten mit aktiviertem Fernlicht eine maximale Beleuchtungsstärke $E_{v,max}$ in 25m von über 160lx. Daraus ergibt sich nach Gleichung 2.5 eine maximale Lichtstärke $I_{v,max}$ des Scheinwerfers von 100.000cd.

Bei grundlegender Auslegung des optischen Systems wie einem Scheinwerfer samt seiner möglichen Lichtverteilungen und Lichtstärken spielt die optische Étendue³ G eine große Rolle [129]. Sie bleibt konstant innerhalb eines idealen optischen Systems und beschreibt die Ausdehnung eines Strahlenbündels, das durch die Fläche des optischen Elements A , den Raumwinkel Ω , den Winkel zur Normalen α und den jeweiligen Brechungsindex n definiert ist.

Im Freiraum gilt damit für die Étendue mit $[G] = \text{m}^2\text{sr}$:

$$\partial^2 G_q = n^2 \partial A_q \cos(\alpha_q) \partial \Omega_q = n^2 \partial A_q \cos(\alpha_q) \frac{\partial A_s \cos(\alpha_s)}{r^2} = n^2 \partial A_s \cos(\alpha_s) \partial \Omega_s = \partial^2 G_s \quad (2.6)$$

Mit:	G_q : Étendue der Quelle	G_s : Étendue der Senke
	A_q : Fläche der Quelle	A_s : Fläche der Senke
	α_q : Winkel zur Flächennormalen der Quelle	α_s : Winkel zur Flächennormalen der Senke

Dies hat zur Folge, dass eine großflächige Lichtquelle mit großem Öffnungswinkel nur mithilfe eines großen Reflektors oder einer großen Linse eng gebündelt werden kann.

2.1.2. Lichtemittierende Diode

Halbleitende Bauelemente halten in Form von lichtemittierenden Dioden (LEDs) bereits seit Anfang der 2000er-Jahre Einzug in Fahrzeughauptscheinwerfer zur Erzeugung von Abblend- und Fernlichtverteilungen. Die LED erzeugt bei Rekombination eines Elektronen-Loch-Paares ein Photon mit der Energie $E_g = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ der Bandlücke zwischen den Leitungs- und Valenzbändern. Der Halbleiter wird so gewählt, dass die Wellenlänge λ blauem monochromatischem Licht entspricht, das mithilfe einer aufgetragenen Phosphorschicht durch Lumineszenz teilweise in gelbes Licht größerer Wellenlänge und damit geringerer Energie konvertiert wird. Je nach Phosphor und seiner Schichtdicke lässt sich die spektrale Zusammensetzung des resultierenden Lichts und damit, äquivalent einem planckschen Strahler, die Farbtemperatur anpassen (vgl. Abbildung 2.1) [27], [73].

³dt.: Lichtleitwert.

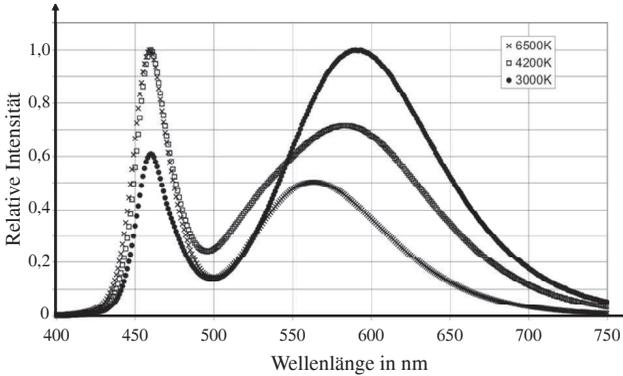


Abbildung 2.1.: Farbtemperatur und Spektrum bei Lumineszenzkonvertierung [47]

Der Einsatz von LEDs in einem Scheinwerfer bringt viele Vorteile mit sich. So eröffnen sie durch ihre Kompaktheit neue Freiheitsgrade des Scheinwerferdesigns und sie sind langlebig [52], wodurch der Scheinwerfer für die Fahrzeuglebensdauer wartungsfrei ausgelegt werden kann. Sie haben gegenüber Halogensystemen auch bei höheren Temperaturen eine vielfach höhere Lichtausbeute ($\eta_{v,led} > 60 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$), die mit der Entwicklungszeit noch steigen und die der Xenon-Gasentladungslampe mit $\eta_{v,Xe} \approx 90 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$ auch bei höheren Durchlassströmen I_F potenziell übertreffen wird. Es können sowohl Einzel- als auch in Multi-LED-Chiplösungen verschiedener Größen verwendet und – eine entsprechende elektronische Beschaltung vorausgesetzt – eine effiziente Dimmbarkeit umgesetzt werden. Sie wird entweder durch Einstellung des Durchlassstroms I_F oder durch Schalten zwischen zwei gewählten Arbeitspunkten mit $I_{F,0} = 0 \text{ A}$ und $I_{F,1} > 0 \text{ A}$ mit einer Frequenz f_{PWM} und einem Tastverhältnis $p = \frac{T_{on}}{T_{ges}}$ realisiert. Da die erstgenannte Lösung in Verbindung mit sich ändernder Stromdichte j_F auch das LED-Spektrum beeinflusst, wird meistens mittels PWM (**P**uls**w**eiten**m**odulation) gedimmt (vgl. Abschnitte 3.2.2 und 3.2.3) [73]. Damit bieten LEDs eine hohe Flexibilität bei Auslegung der gewünschten Lichtmenge und gleichzeitig eine hohe Effizienz.

2.2. Bewertungsverfahren als Entscheidungsstütze zur Auslegung einer Systemarchitektur

Die Entwicklung einer Systemarchitektur in Hardware- wie auch Softwarebereichen nimmt allgemein einen hohen Stellenwert ein, da falsche Entscheidungen während der Planungsphase erhebliche Auswirkungen auf das Erreichen der gesetzten Ziele haben.



2.2.1. Entscheidungsprobleme und -theorie

Nach *Heinen* sind Ziele in betriebswirtschaftlicher Bedeutung Zustände bzw. erwünschte Merkmale von Zuständen [49]. Ihre Umsetzung wird anhand von Merkmalen festgemacht, die durch Kriterien beschrieben werden. Dabei weisen Ziele bzw. zu erfüllende Kriterien verschiedene Abhängigkeitsbeziehungen zueinander auf, die sich als konkurrierend bzw. konfliktär oder als sich unterstützend bzw. kompatibel darstellen [161], [44]. So soll eine Systemarchitektur oft zum einen ressourcenschonend und zum anderen flexibel und skalierbar sein [151]. Zur Erfüllung der Ziele wird der *Aktor* mit Entscheidungsproblemen konfrontiert. Naturgemäß können gelöste Entscheidungsprobleme bzw. getroffene Entscheidungen insbesondere die Erfüllung konkurrierender Ziele stark negativ beeinflussen. Man unterscheidet hierbei zwischen einfachen, oft gut strukturierten Wahlproblemen und komplexen, schlecht strukturierten Gestaltungsproblemen. Die Entscheidung kann dabei nach folgenden Prinzipien getroffen werden (vgl. [44]):

- Intuition
- Nutzung einer Lösung zurückliegender Problemstellungen
- Übernahme einer Expertenlösung ohne Hinterfragen
- Zufallsmechanismus
- Rationaler Denkprozess

Während die ersten vier Ansätze generell eine vereinfachte Möglichkeit bieten, auch komplexe mehrkriterielle Probleme zeit- und damit kosteneffizient zu entscheiden, bergen sie doch eine erhöhte Gefahr, falsche Entscheidungen zu treffen. Da sich die Auswirkungen meist in späteren Entwicklungsphasen herausstellen, führt dies zu großen Nacharbeitungsaufwänden und einer Gefährdung des Gesamtprojekts. Um falsche Entscheidungen möglichst zu vermeiden, ist es notwendig, die Architekturkomponenten, Ziele und Rahmenbedingungen möglichst früh zu definieren und zu analysieren. Die Analyse zur Entscheidungsfindung beruht hierbei auf einem rationalen Prozess, bei dem die Kriterien zur Erfüllung von gesetzten Zielen – unter gegebenen Rahmenbedingungen durch Nutzung von Architekturkomponenten – nach ihrer Bedeutung gewichtet und ihrem Erfüllungsgrad bewertet werden.

Entscheidungsprozesse

Entscheidungsprozesse lassen sich zwei Entscheidungstheorien zuordnen: der *präskriptiven* und der *deskriptiven*. Die deskriptive Entscheidungstheorie bewertet objektiv insbesondere auch die Sinnhaftigkeit der Entscheidungsprämissen. Die präskriptive dagegen beinhaltet alleine den Vorgang einer Rationalanalyse, nach der eine Entscheidung getroffen wird. Hierbei wird zwischen *formaler* und *substantieller* Rationalität

unterschieden. Während bei formaler Rationalität die zu erfüllenden Ziele nicht bezüglich ihrer Richtigkeit infrage gestellt werden, erfolgt bei substantieller Rationalität neben dem Entscheidungsprozess als solchen auch eine Prüfung der Ziele. Bei Annahme einer Zieldefinition nach subjektivem Ermessen existieren keine irrationalen Ziele, wodurch formal rationale Entscheidungsprozesse durchgeführt werden [14], [44].

Allgemein erhöht eine rationale Entscheidungsfindung den Bewertungsaufwand, der als *Mittel* gerechtfertigt bzw. „vernünftig“ gegenüber der Reduzierung der Risiken und Optimierung der Zielerreichung als *Zweck* sein soll [161]. So ist stets abzuwägen, ob auf einen rationalen Prozess zurückgegriffen werden oder besser eine Lösung auf Erfahrungsgrundlage getroffen sollte. Des Weiteren ist eine falsche Entscheidung nicht mit einer irrationalen gleichzusetzen, solange die Entscheidung nach einem rationalen Prozess getroffen wurde und für Außenstehende im Nachhinein nachvollziehbar bleibt [101].

Phasen einer rationalen Entscheidung

Um ein komplexes Problem mithilfe eines rationalen Entscheidungsprozesses zu lösen, wird dieses in Komponenten bzw. Einzelprobleme zerlegt. Es erfolgt die sogenannte *Dekomposition*. Dabei sind Ziele, Alternativen, Rahmenbedingungen und ihre jeweiligen Konsequenzen herauszuarbeiten und nach ihren Präferenzen zu ordnen [31]. Im Anschluss werden die einzelnen Bestandteile in ihrer Gesamtwirkung bewertet. Hierfür wird üblicherweise mittels folgender vier Schritte vorgegangen:

1. *Definition der Ziele bzw. Kriterien zur Zielerreichung und Analyse der Rahmenbedingungen:*

Zur Entscheidungsfindung wird zunächst das Gesamtziel definiert. Da die Erfüllung des Ziels durch seine untergeordneten Ziele und Kriterien definiert wird, werden sie herausgearbeitet. Eingeschränkt durch gegebene Rahmenbedingungen können Ziele oft nur kompromissbehaftet erreicht werden. Hierfür sind entsprechende Präferenzen zu bestimmen.

2. *Erarbeitung sinnvoller Lösungsalternativen:*

Bei diesem Schritt findet eine Sammlung der Lösungsalternativen statt. Diejenigen, die zur Erreichung des Gesamtziels unter gegebenen Rahmenbedingungen beitragen, werden ausgewählt, der Rest herausgefiltert, um den Aufwand des Entscheidungsprozesses zu reduzieren.

3. *Erörterung ausgewählter Lösungsalternativen:*

Die ausgewählten Lösungsalternativen werden möglichst detailliert auf ihre Konsequenzen untersucht. Hierbei erfolgt ihre Prüfung nach einzelnen Kriterien zur Erfüllung des Gesamtziels.



4. Bewertung der Lösungsalternativen und Entscheidung:

Im letzten Schritt werden die Lösungsalternativen nach ihren Konsequenzen für die Erfüllung der jeweiligen Kriterien miteinander verglichen und bewertet. Im Anschluss wird die am höchsten bewertete Alternative als Lösung des Entscheidungsproblems bestimmt.

Zielsysteme und Subsysteme

Tabelle 2.1.: Unterteilung eines Zielsystems in Subsysteme [44]

Kriterien	Subsysteme		
Inhalt	leistungswirtschaftliche Ziele	finanzwirtschaftliche Ziele	soziale Ziele
Ausmaß der Zielerreichung	Optimierungsziele		Satisfizierungsziele
Zeitlicher Bezug	kurzfristige Ziele	mittelfristige Ziele	langfristige Ziele
Geltungsbereich	geographisch umschrieben		
	juristisch umschrieben		
	organisatorisch umschrieben		
Bedeutung	Hauptziele		Nebenziele
Quantifizierbarkeit	quantitative Ziele		qualitative Ziele
Operationalisierbarkeit	operationale Ziele		nicht operationale Ziele

Tabelle 2.1 zeigt allgemeingültige Subziele, in die ein Zielsystem unterteilt werden kann. Trotz eines betriebswirtschaftlichen Schwerpunktes lassen sie sich auch ohne Weiteres auf die technische Systemarchitekturentwicklung anwenden. So lassen sich leistungswirtschaftliche, finanzwirtschaftliche und soziale Ziele unter anderem durch Systemperformanz, Entwicklungskosten und Stromaufnahme repräsentieren, wobei eine eindeutige Zuordnung nicht immer gelingt. Die Höhe der Stromaufnahme hat direkte Auswirkungen auf den CO₂-Ausstoß, auf die Erwärmung der entsprechenden Architekturkomponente inklusive möglicher Performanzeinbußen und auch auf die Kosten durch Verbau leistungsgerechter Versorgungsmodule. Während Optimierungsziele durch Kriterien abgebildet werden, die nach Möglichkeit minimiert (Kosten, Stromaufnahme) oder maximiert (Wiederverwendbarkeit) werden, ist bei Satisfizierungszielen ein bestimmtes Erfüllungsniveau zu erreichen. Ein Beispiel dazu stellt das Timingverhalten eines Systems dar. Alle Ziele haben auch einen zeitlichen Bezug. So ist Erweiterbarkeit eines Systems eher als mittel- bis langfristiges Ziel einzustufen, Entwicklungskosten bis zum Serieneinsatz dagegen als kurzfristiges Ziel. Das Kriterium Geltungsbereich spielt teilweise auch in einer technischen Systemarchitektur eine Rolle, und zwar immer dann, wenn gesetzliche Vorgaben, ortsabhängige Einflüsse und andere Rahmenfaktoren erfüllt werden müssen.